



Universidad
Carlos III de Madrid

Ingeniería Industrial

PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO DE SISTEMA DE ELEVACIÓN EN *REEVING* Y SISTEMA DE *SKEW* APLICABLES A GRÚAS DE PATIO PORTUARIAS

Autor: Antonio Ariza Escudero

Tutor: Higinio Rubio Alonso

Leganés, Septiembre de 2015



Título: Estudio de sistema de elevación en *reeving* y sistema de *skew* aplicables a grúas de patio portuarias

Autor: Antonio Ariza Escudero

Tutor: Dr. Higinio Rubio Alonso

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día___ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto supone la culminación de los estudios universitarios de, en mi caso, un chico, hijo de padres trabajadores, procedente de un pequeño pueblo de la comarca de La Mancha llamado El Romeral, al cual solo unos pocos elegidos tienen la suerte de pertenecer.

En estas líneas, quisiera aprovechar para acordarme y dar las gracias a todas aquellas personas que me han acompañado durante esta etapa de mi vida. Sin duda, no habría sido posible llegar hasta aquí sin su ayuda y apoyo.

Acordarme en primer lugar de mis padres, por el gran esfuerzo que les ha supuesto que sus dos hijos cursaran estudios universitarios. Porque las cosas no les han resultado nada fáciles, teniendo que superar situaciones muy difíciles durante este periodo. Sé que la finalización de los estudios, tanto de mi hermana, como los míos, supone una gran satisfacción para ellos.

Hacer mención a mi hermana, por su cariño y su capacidad de transmitir alegría cuando las cosas no salen bien. Un abrazo fuerte para ella.

Dedicar también unas palabras a mis compañeros de piso en Getafe, Carlos y Guiller. Les agradezco de verdad lo fácil que me ha resultado la convivencia con ellos. Siempre hubo un entendimiento pleno entre nosotros. Más que compañeros de piso, hemos sido como hermanos. Un fuerte abrazo también para ellos.

Acordarme de los amigos que estuvieron a mi lado en los momentos más difíciles, sirviendo de apoyo para salir de esas situaciones. Muchas gracias por todo.

No quisiera olvidarme de Blasa y Almudena, siempre dispuestas a tenderme la mano y a animarme en los momentos en los que me he sentido más decaído. Gracias, porque desde el primer momento me han acogido y me han hecho sentir como uno más de la familia.

Por último, y más importante, voy a dedicar unas palabras a Bea. Durante este periodo hemos vivido muchas situaciones: cambios, alegrías, momentos difíciles, etc. Sin su apoyo incondicional, su cariño y su comprensión, sin duda, hoy no estaría escribiendo estas líneas. Te doy las gracias por todo y deseo que sigas estando a mi lado en esta nueva etapa de mi vida. Un beso muy grande.

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo principal el modelado, simulación y análisis del comportamiento del sistema de elevación con configuración en *reeving* y sistema para producir giro en la carga en torno al eje vertical (*skew*), válidos para su utilización en grúas de patio de terminales portuarias. Para ello haremos uso de los software de simulación dinámica *Working Model 2D* y *Working Model 3D*.

La principal razón por la cual se quiere implantar el sistema en *reeving* y su correspondiente sistema de *skew*, es la simplificación de los actuales sistemas de elevación de la compañía que propone el proyecto, para así reducir los costes de las nuevas grúas, tanto en su adquisición como en el mantenimiento.

Comenzaremos mostrando la justificación, los objetivos del proyecto y la estructura de esta memoria, para continuar hablando sobre el tipo de grúa al que se le van a acoplar estos sistemas, así como de los distintos elementos que intervienen en el proceso de transporte de contenedores por medio de estos aparatos. Explicaremos también en qué consiste el sistema en *reeving* de cables y el sistema de *skew*.

A continuación, expondremos la metodología por medio de la cual llevaremos a cabo el proyecto y mostraremos la forma en que hemos creado los modelos en los programas que hemos señalado anteriormente.

Una vez hecho todo lo anterior, realizaremos las simulaciones en 2D, al objeto de comprender en primera instancia el sistema de cables en *reeving* y fijar el valor de algún parámetro. Después de analizar los resultados obtenidos, llevaremos a cabo otra serie de simulaciones en 3D para observar el comportamiento del sistema al variar ciertos parámetros de amarre de los cables, el sistema de *skew* y el efecto de introducir yugos en la grúa con el objetivo de regular las tensiones en los distintos cables.

Por último, realizaremos un presupuesto en el que se muestren los costes que supondría llevar a cabo el presente proyecto. Terminaremos mostrando las conclusiones a las que hemos llegado tras la realización del mismo y propondremos algunos trabajos futuros que se podrían llevar a cabo.

PALABRAS CLAVE

Grúa de patio, cable, *reeving*, *skew*, carga suspendida, yugo, giro, desplazamiento, movimiento de la grúa en dirección del carro, movimiento de la grúa en dirección del pórtico, régimen estático y régimen dinámico



ABSTRACT

This project's main goal is modeling, simulating and analyzing the behavior of a lifting system with a *reeving* construction and a system that turns a load round its vertical axis (*skew*). The system should be operative for use in yards cranes of port terminals. To accomplish this, we will use dynamic simulation software; *Working Model 2D* and *Working Model 3D*.

The main reason to implement the *reeving* system and the associated *skew* system is to simplify the existing lifting systems of the cranes of the company. They proposed this project, to reduce costs of the new cranes, in both purchase and maintenance.

We start by justifying the project and objectives and the memoir structure, and continue talking about the type of crane that is going to use these systems, as well as the different elements that intervene in the transport process with these devices. Also we will define and explain the *reeving* and *skew* systems.

Then, we will expose the methodology by carrying out the project and show how we have created these models in the programs noted above.

Having done all this, we will make 2D simulations, in order to understand the cables system in *reeving* and set the value of the parameters. After analyzing these results, we will carry out a series of 3D simulations to observe the system's behavior and adjust the mooring cables parameters, the *skew* system and the effects of introducing yokes in the crane in order to adjust tensions on the individual cables.

Finally, we will present a budget in which we will show the cost to carry out this project. We will finish showing the conclusions we have reached after the completion of the project and we will propose some future adjustments that could be carry out.

KEY WORDS

Yard crane, cable, *reeving*, *skew*, suspended load, yoke, turn, displacement, crane's movement in the direction of the trolley, crane's movement in the direction of the portico, static regime and dynamic regime.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: Introducción	29
1 Justificación del proyecto	30
2 Objetivos del proyecto	32
3 Estructura de la memoria	34
CAPÍTULO 2: El contenedor. La grúa: partes y elementos importantes que intervienen en el proceso de transporte. El sistema de cables en <i>reeving</i> y el sistema de <i>skew</i> ...	37
1 El contenedor	39
2 La grúa. Elementos importantes dentro del proceso de transporte.....	45
2.1 La grúa de patio.....	45
2.2 Elementos importantes dentro del proceso de transporte	47
2.2.1 Carro	47
2.2.2 Cables.....	48
2.2.2.1 Cable utilizado en las simulaciones	52
2.2.3 <i>Spreader</i>	54
2.2.4 <i>Twist-lock</i> y cantonera.....	56
3 El sistema de cables en <i>reeving</i> y el sistema de <i>skew</i>	57
3.1 El sistema de cables en <i>reeving</i>	57
3.2 El sistema de <i>skew</i>	58
CAPÍTULO 3: Metodología	61
1 Antecedentes del proyecto	62
2 Herramientas utilizadas	66
3 Elementos que conforman el modelo	67
3.1 Dimensiones y características de los distintos elementos con masa del modelo 2D	68
3.1.1 Cambio rápido, <i>spreader</i> y carro	68
3.1.1.1 Modelo 2D	68
3.1.1.2 Modelo 3D	68
3.1.2 Contenedor	69



3.1.2.1	Modelo 2D	70
3.1.2.2	Modelo 3D	70
3.2	Cables	71
3.2.1	Aclaración sobre los cables verticales del modelo 2D	72
4	Disposición de la carga	75
4.1	Modelo 2D.....	75
4.1.1	Presentación y cálculos para los distintos casos	75
4.1.2	Resumen y justificación de los distintos casos usados	79
4.2	Modelo 3D.....	83
4.2.1	Presentación y cálculos para los distintos casos	84
4.2.2	Resumen de los distintos caso usados	87
5	Posición de los anclajes de los cables, parámetros a variar y peculiaridades de cada modelo	91
5.1	Modelo 2D.....	91
5.2	Modelo 3D.....	93
5.2.1	Simulaciones con parámetros para la variación de los anclajes de los cables al carro y al cambio rápido	94
5.2.2	Simulaciones con inducción de <i>skew</i> en la carga suspendida	97
5.2.3	Introducción de yugo en los anclajes de ciertos cables al cambio rápido.....	98
6	Resultados a estudiar y método seguido para obtenerlos.....	102
6.1	Resultados a obtener	102
6.2	Método seguido para obtener los resultados.....	107
CAPÍTULO 4: Creación del modelo en <i>Working Model 2D</i> y <i>Working Model 3D</i>.....		109
1	Construcción del modelo con <i>Working Model 2D</i>	110
1.1	Creación de los componentes del sistema.....	110
1.2	Ajustes de los parámetros de precisión de la simulación y del tiempo en el que dicha simulación se debe detener	125
1.3	Posición inicial.....	127
1.3.1	Carga centrada en x	128
1.3.2	Carga descentrada en x	130
1.4	Obtención de los datos	136

2	Construcción del modelo con <i>Working Model 3D</i>	138
2.1	Creación de los componentes del sistema.....	138
2.2	Ajuste de los parámetros de precisión de la simulación y del tiempo en el que dicha simulación se debe detener	149
2.3	Posición inicial.....	150
2.4	Obtención de los datos	151
CAPÍTULO 5: Resultados de las simulaciones en 2D		153
1	Análisis de las primeras simulaciones	155
1.1	Caso 2: carga centrada con CM alto.....	155
1.2	Caso 4: carga descentrada en +x con CM alto	160
2	Resultados finales.....	164
2.1	Casos con carga centrada.....	164
2.1.1	Caso 1: contenedor vacío	164
2.1.2	Caso 2: carga centrada con CM alto	170
2.1.3	Caso 3: carga centrada con CM bajo	175
2.2	Casos con carga descentrada	180
2.2.1	Caso 4: carga descentrada en +x con CM alto	180
2.2.2	Caso 5: carga descentrada en -x con CM alto	187
2.2.3	Caso 6: carga descentrada en +x con CM bajo	191
2.2.4	Caso 7: carga descentrada en -x con CM bajo	197
3	Discusión de los resultados	202
CAPÍTULO 6: Resultados de las simulaciones en 3D		213
1	Análisis de la primera simulación	215
2	Resultados finales.....	222
2.1	Simulaciones con variación de parámetros de amarre de los cables al carro y al cambio rápido	222
2.1.1	Aceleración en la dirección del carro	223
2.1.2	Aceleración en la dirección del pórtico	229
2.1.3	Resumen	236
2.2	Simulaciones con inducción de <i>skew</i> en la carga suspendida	238



2.2.1	Simulaciones en régimen estático	239
2.2.2	Simulaciones en régimen dinámico	241
2.3	Introducción de yugo en los anclajes de ciertos cables al cambio rápido	245
2.3.1	Aceleración en la dirección del carro	248
2.3.2	Aceleración en la dirección del pórtico	255
3	Discusión de los resultados	259
CAPÍTULO 7: Presupuesto		263
CAPÍTULO 8: Conclusiones y trabajos futuros		267
1	Conclusiones.....	268
2	Trabajos futuros	270
CAPÍTULO 9: Bibliografía		271
1	Bibliografía.....	272
2	Referencias electrónicas.....	273

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Imagen de un puerto marítimo. Zona de transporte de contenedores.....	30
Figura 1.2: Grúa de patio (izquierda) y grúa modelo <i>ship to shore</i> (derecha)	31
Figura 2.3: Grúa de patio.....	38
Figura 2.4: Grúa modelo <i>ship to shore</i>	38
Figura 2.5: Ejemplo de contenedor marítimo	39
Figura 2.6: Contenedor modelo <i>dry van</i>	40
Figura 2.7: Contenedor modelo <i>reefer</i>	41
Figura 2.8: Contenedor modelo <i>open top</i>	41
Figura 2.9: Contenedor modelo <i>flat racks</i>	42
Figura 2.10: Contenedor modelo <i>open side</i>	42
Figura 2.11: Contenedor modelo <i>tank</i>	43
Figura 2.12: Contenedor modelo <i>flexi-tank</i>	43
Figura 2.13: Contenedor modelo plataforma	44
Figura 2.14: Grúa de patio modelo RMG (izquierda) y grúa de patio modelo RTG (derecha)....	45
Figura 2.15: Dirección de los distintos movimientos de la grúa	46
Figura 2.16: Numeración de las distintas partes de una grúa pórtico [1].....	46
Figura 2.17: Situación del carro dentro de una grúa de patio	47
Figura 2.18: Alambre, cordón, alma y cable [2]	48
Figura 2.19: Tipos de cordones con alambres de igual diámetro [1]	49
Figura 2.20: Cordón <i>Seale</i> [2]	49
Figura 2.21: Cordón <i>Filler</i> o de relleno (<i>Filler-Wire</i>) [2]	49
Figura 2.22: Cordón <i>Warrington</i> [2].....	50
Figura 2.23: Cordón <i>Warrington-Seale</i> [2]	50
Figura 2.24: Cordones con alambres en forma de x (izquierda), de z (centro y derecha) o trapezoidales (derecha) [2]	50
Figura 2.25: Cordones con perímetro triangular (izquierda) y elíptico (derecha) [1].....	51
Figura 2.26: Composición del tipo cable que es utilizado en las grúas de puerto de la compañía	52
Figura 2.27: Numeración de los distintos componentes del <i>spreader</i> [1].....	54
Figura 2.28: Muestra del funcionamiento de un <i>twist-lock</i>	56
Figura 2.29: Detalle de un <i>twist-lock</i> [1]	56

Figura 2.30: Vista isométrica de un sistema de cables en <i>reeving</i> , donde se muestran el carro y el <i>spreader</i>	57
Figura 2.31: Esquema básico del sistema <i>reeving</i>	58
Figura 2.32: Nombre que se le da a los distintos giros que tienen lugar en un contenedor transportado por una grúa.....	59
Figura 2.33: Poleas que se moverán (y sentido del movimiento de las mismas) para hacer que el contenedor gire en <i>skew</i> . Vista isométrica	60
Figura 2.34: Poleas que se moverán (y sentido del movimiento de las mismas) para hacer que el contenedor gire en <i>skew</i> . Vista en planta	60
Figura 3.35: Esquema del sistema de cables actual, que consta de mecanismo de elevación y mecanismo “antibalanceo”	62
Figura 3.36: Sistema de elevación (izquierda) y “antibalanceo” (derecha) por separado	62
Figura 3.37: Esquema del sistema en <i>reeving</i> a implantar	63
Figura 3.38: Esquema del sistema en <i>reeving</i> utilizado por Paceco en los años 60	64
Figura 3.39: Esquema del sistema en <i>reeving</i> , evolucionado del utilizado en la década de los 60, con “antibalanceo” activo	64
Figura 3.40: Dirección del movimiento de las poleas desplazadas (señaladas en verde) para producir <i>reeving</i> en la carga suspendida. Vista isométrica.....	65
Figura 3.41: Dirección del movimiento de las poleas desplazadas (señaladas en verde) para producir <i>reeving</i> en la carga suspendida. Vista en planta	65
Figura 3.42: Logotipo de <i>Working Model 2D</i>	66
Figura 3.43: Logotipo de <i>Working Model 3D</i>	66
Figura 3.44: Bocetos iniciales de los sistemas en 2D (izquierda) y 3D (derecha)	67
Figura 3.45: Dimensiones del cambio rápido, <i>spreader</i> y carro para el modelo 2D.....	68
Figura 3.46: Dimensiones del cambio rápido, <i>spreader</i> y carro para el modelo 3D.....	69
Figura 3.47: Cotas para el modelado del contenedor en <i>Working Model 2D</i>	70
Figura 3.48: Disposición de los diferentes elementos que forman el contenedor en el modelo 3D	71
Figura 3.49: Dimensiones del contenedor en el modelo 3D	71
Figura 3.50: Esquema para el cálculo de la fuerza F_s	72
Figura 3.51: Sistema de coordenadas en ejes del contenedor para el 2D.....	75
Figura 3.52: Posición del centro de masa del contenedor en los casos en los que trabajaremos con carga nominal (casos del 2 al 6)	82
Figura 3.53: Vistas isométrica (arriba izquierda), perfil (arriba derecha), planta (abajo izquierda) y alzado (abajo derecha) del contenedor con el sistema de coordenadas propio del mismo ...	83
Figura 3.54: Disposición en el plano de los distintos elementos que formarán el modelo en <i>Working Model 2D</i> con sus correspondientes cotas.....	92

Figura 3.55: Signo del cruzamiento c	92
Figura 3.56: Vista isométrica (arriba a la izquierda), en perfil (arriba a la derecha) y alzado (abajo) del modelo en 3D con el sistema de coordenadas utilizado en las simulaciones	93
Figura 3.57: Vista en planta del sistema para la visualización de los anclajes de los cables así como los parámetros d_x , d_y y d_A	95
Figura 3.58: Vista en planta del sistema para aclaración del parámetro d_x	95
Figura 3.59: Vista en planta del sistema para aclaración del parámetro d_y	96
Figura 3.60: Vista en planta del sistema para aclaración del parámetro d_A	96
Figura 3.61: Vista en planta del sistema para la visualización de los amarres de los cables y el desplazamiento δ para realizar <i>skew</i> en la carga suspendida	97
Figura 3.62: Figura para la visualización del alargamiento de los cables en el modelo debido al desplazamiento δ en la polea de salida del carro. A la izquierda, el cable antes de realizar dicho desplazamiento y a la derecha el cable una vez realizado el mismo.	98
Figura 3.63: Yugo triangular	99
Figura 3.64: Introducción del yugo dentro del modelo	99
Figura 3.65: Dimensiones del yugo introducido en el modelo 3D	100
Figura 3.66: Dimensiones del suplemento para el modelo 3D con yugo	100
Figura 3.67: Vista general de los yugos y los suplementos dentro del modelo en <i>Working Model 3D</i> (arriba), detalle de yugo dentro del modelo en <i>Working Model 3D</i> (abajo izquierda) y detalle de suplemento del modelo en <i>Working Model 3D</i> (abajo derecha)	101
Figura 3.68: Vista en planta del sistema para la visualización de los amarres de los cables para el sistema en 3D con yugo, teniendo en cuenta que en el cambio rápido los cables se unen a su correspondiente yugo o suplemento	102
Figura 3.69: Vista de perfil (arriba izquierda), alzado (arriba derecha) y planta (abajo) de la carga suspendida con el punto de toma de medidas de la citada carga en las simulaciones en 3D	105
Figura 4.70: Pantalla inicial de <i>Working Model 2D</i>	110
Figura 4.71: Selección de la función <i>Number and Units</i>	111
Figura 4.72: Configuración de los valores de la función <i>Numbers and Units</i>	111
Figura 4.73: Selección de la herramienta <i>Rectangle</i>	112
Figura 4.74: Apertura del menú <i>Window</i>	112
Figura 4.75: Configuración de valores de la función <i>Geometry</i> del rectángulo correspondiente al carro	113
Figura 4.76: Configuración de valores de la función <i>Properties</i> del rectángulo correspondiente al carro	113
Figura 4.77: Configuración de las distintas opciones de la función <i>Appearance</i> correspondiente al rectángulo del carro	114

Figura 4.78: Apariencia del rectángulo que modela el carro dentro del entorno <i>Working Model 2D</i>	114
Figura 4.79: Apariencia de los rectángulos que simulan carro, cambio rápido, <i>spreader</i> y contenedor en <i>Working Model 2D</i>	115
Figura 4.80: Selección de la herramienta <i>Rigid joint</i>	115
Figura 4.81: Apariencia de la unión rígida entre piezas en <i>Working Model 2D</i>	116
Figura 4.82: Selección de la herramienta <i>Point element</i>	116
Figura 4.83: Apariencia de los <i>Point element</i> creados para los amarres del cable 1 en <i>Working Model 2D</i>	117
Figura 4.84: Selección de la herramienta <i>Spring</i>	117
Figura 4.85: Apariencia del resorte creado para el cable 1 en <i>Working Model 2D</i>	118
Figura 4.86: Apariencia de los 4 muelles que representan los 4 cables del sistema en <i>Working Model 2D</i>	118
Figura 4.87: Selección de la herramienta <i>Keyed Slot joint</i>	119
Figura 4.88: Apariencia del <i>Keyed Slot joint</i> creado para el modelo en <i>Working Model 2D</i>	119
Figura 4.89: Selección de la herramienta <i>Actuator</i>	120
Figura 4.90: Apariencia del modelo en <i>Working Model 2D</i> una vez hemos creado todos los elementos y sus uniones	120
Figura 4.91: Ventana de la función <i>Propierties</i> referente al cable 1 del modelo	121
Figura 4.92: Selección de la herramienta <i>Generic Control</i>	122
Figura 4.93: Apariencia inicial de un <i>Generic Control</i>	122
Figura 4.94: Configuración de las distintas opciones de la función <i>Appearance</i> del <i>Generic Control</i> en el cual marcaremos los valores que queramos que tome el cruzamiento <i>c</i>	123
Figura 4.95: Configuración de las distintas opciones del <i>Generic Control</i> referente al cruzamiento <i>c</i>	123
Figura 4.96: Apariencia final del <i>Generic Control</i> referente al cruzamiento <i>c</i>	124
Figura 4.97: Apariencia final de los 3 <i>Generic Control</i> creados para los distintos parámetros a introducir en el modelo.....	124
Figura 4.98: Ventana <i>Propierties</i> de los muelles que simulan los cables 1 y 2 una vez introducidas las fórmulas para el cálculo de los parámetros de dichos muelles.....	125
Figura 4.99: Selección de la función <i>Accuracy</i>	126
Figura 4.100: Valores de distintos parámetros de la función <i>Accuracy</i> del modelo.....	126
Figura 4.101: Selección de la función <i>Pause Control</i>	127
Figura 4.102: Configuración del tiempo de parada de la simulación.....	127
Figura 4.103: Sistema de coordenadas en ejes del contenedor	128

Figura 4.104: Esquema para el cálculo del desplazamiento vertical δ_y necesario para la obtención de la posición inicial de equilibrio estático cuando tenemos carga centrada en x .	129
Figura 4.105: Apariencia del <i>Generic Control</i> para la introducción del desplazamiento δ_y inicial	130
Figura 4.106: Valores iniciales de la función <i>Propierties</i> del carro que nos aseguran que éste se encuentra inmóvil para el cálculo de la posición inicial de equilibrio estático	131
Figura 4.107: Selección de las distintas opciones del submenú <i>Velocity</i> que nos son de interés	132
Figura 4.108: Ventanas en las que seguiremos la evolución temporal de los valores de las distintas velocidades en <i>Working Model 2D</i>	132
Figura 4.109: Gráficas temporales de velocidades obtenidas al poner a correr la simulación por primera vez	133
Figura 4.110: Herramienta de <i>Working Model 2D</i> que nos permite movernos hacia delante o detrás en el tiempo de la simulación	133
Figura 4.111: Instante de tiempo en el que tenemos un máximo en una de las gráficas de velocidad	134
Figura 4.112: Selección de la herramienta <i>Start Here</i>	134
Figura 4.113: Valores nulos de velocidad del elemento que simula el <i>spreader</i> para el proceso de cálculo de la posición inicial de equilibrio estático	135
Figura 4.114: Mejoría de la gráfica temporal de velocidad a la que se ha aplicado los pasos anteriores para el cálculo de la posición inicial de equilibrio estático	135
Figura 4.115: Opciones dentro del menú <i>Measure</i>	136
Figura 4.116: Selección de la función <i>Export</i>	137
Figura 4.117: Pantalla inicial de <i>Working Model 3D</i>	138
Figura 4.118: Selección de la función <i>Numbers & Units</i>	139
Figura 4.119: Opciones elegidas en la función <i>Number & Units</i>	139
Figura 4.120: Selección de la herramienta <i>Box</i>	139
Figura 4.121: Prisma rectangular creado con la herramienta <i>Box</i>	140
Figura 4.122: Introducción de las dimensiones del elemento seleccionado	140
Figura 4.123: Aspecto de los elementos creados para modelar carro, cambio rápido, <i>spreader</i> y contenedor	140
Figura 4.124: Selección de la herramienta <i>Coord</i>	141
Figura 4.125: <i>Coord</i> creado en el carro	141
Figura 4.126: Introducción de las coordenadas del <i>Coord</i> creado en referencia al centro geométrico del carro	142
Figura 4.127: Selección de la función <i>Create Constraint</i>	142

Figura 4.128: Selección de las distintas opciones para la creación del resorte que simulará el cable 1 dentro de la función <i>Create Constraint</i>	143
Figura 4.129: Aspecto del resorte creado para simular el cable 1	143
Figura 4.130: Introducción de las propiedades del resorte que simula el cable 1	144
Figura 4.131: Aspecto del sistema con todos los resortes creados	144
Figura 4.132: Opciones elegidas para la creación del <i>Rigid Joint</i> que une <i>spreader</i> y cambio rápido dentro de la función <i>Create Constraint</i>	145
Figura 4.133: Opciones elegidas para la creación del <i>Rigid Joint on Slot</i> dentro de la función <i>Create Constraint</i>	145
Figura 4.134: Selección del <i>Rigid Joint on Slot</i> creado	146
Figura 4.135: Opciones elegidas para el correcto funcionamiento del <i>Rigid Joint on Slot</i> creado	146
Figura 4.136: Opciones elegidas para la creación del <i>Linear Actuator</i> dentro de la función <i>Create Constraint</i>	147
Figura 4.137: Aspecto del <i>Linear Actuator</i> creado en el modelo	147
Figura 4.138: Pestaña <i>Active</i> dentro de la ventana de propiedades del cable 1	148
Figura 4.139: Opciones y expresión introducidas en la ventana <i>Active</i> de la ventana de propiedades del Cable 1 para que éste sólo trabaje a tracción	148
Figura 4.140: Selección de la función <i>Accuracy</i>	149
Figura 4.141: Opciones y valores elegidos para las simulaciones dentro de la función <i>Accuracy</i>	149
Figura 4.142: Selección de la función <i>Pause Control</i>	150
Figura 4.143: Opciones elegidas para las simulaciones dentro de la función <i>Pause Control</i> ...	150
Figura 4.144: Selección de la función <i>Erase History</i>	151
Figura 4.145: Opciones ofrecidas por el menú <i>Measure</i> cuando tenemos seleccionado el carro	151
Figura 4.146: Selección de la función <i>Export Meters</i>	152
Figura 5.147: Disposición en el plano de los distintos elementos que formarán el modelo en <i>Working Model 2D</i> con sus correspondientes cotas	154
Figura 5.148: Tendencia de las curvas de tensión máxima	170
Figura 5.149: Figura para recordar cómo han sido nombrados los cables que forman el sistema	210
Figura 6.150: Posición del sistema de coordenadas utilizado en las simulaciones con el distinto posicionamiento de los elementos <i>Ci</i>	214
Figura 6.151: Vista en planta del sistema con las cotas de los puntos de amarre de los cables al carro (en azul) y al cambio rápido (en rojo) utilizados en la primera simulación en 3D	215
Figura 6.152: Vista en planta del sistema para la visualización de los parámetros d_x , d_y y d_A ..	222

Figura 6.153: Vista en planta del sistema para la visualización de los amarres de los cables y el desplazamiento δ para realizar <i>skew</i> en la carga suspendida	238
Figura 6.154: Vista en planta del sistema con los cables que aumentan su tensión (en rojo) y con los que disminuyen su tensión (en azul) al realizar <i>skew</i> en la carga suspendida	241
Figura 6.155: Dimensiones del yugo introducido en el modelo 3D	246
Figura 6.156: Introducción del yugo dentro del modelo	246
Figura 6.157: Dimensiones del suplemento para el modelo 3D con yugo.....	247
Figura 6.158: Vista de los yugos y los suplementos dentro del modelo en <i>Working Model 3D</i>	247
Figura 6.159: Vista en planta del sistema con los cables que aumentan su tensión (en rojo) y con los que disminuyen su tensión (en azul) al realizar <i>skew</i> en la carga suspendida	261

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 5.1: Posición relativa en x del centro de masa de la carga suspendida ($x_{carro}-x_{CM}$) en función del tiempo	156
Gráfica 5.2: Posición en y del centro de masa de la carga suspendida en función del tiempo	156
Gráfica 5.3: Giro de la carga suspendida en función del tiempo	157
Gráfica 5.4: Componente x de la aceleración del centro de masa de la carga suspendida en función del tiempo	158
Gráfica 5.5: Aceleración angular de la carga suspendida en función del tiempo	158
Gráfica 5.6: Análisis rápido de Fourier de la componente x de la aceleración del centro de masa de la carga suspendida	159
Gráfica 5.7: Análisis rápido de Fourier de la aceleración angular de la carga suspendida	159
Gráfica 5.8: Componente x de la aceleración del centro de masa de la carga suspendida en función del tiempo	161
Gráfica 5.9: Aceleración angular de la carga suspendida en función del tiempo	161
Gráfica 5.10: Análisis rápido de Fourier de la componente x de la aceleración del centro de masa de la carga suspendida	162
Gráfica 5.11: Análisis rápido de Fourier de la aceleración angular de la carga suspendida	162
Gráfica 5.12: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{pirnx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 1.....	164
Gráfica 5.13: Curva de cruzamiento para el mínimo valor de amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x de la carga suspendida (c_{minx}) en función de la altura de suspensión para el caso 1.....	165
Gráfica 5.14: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 1.....	166
Gráfica 5.15: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{prin\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 1.....	167
Gráfica 5.16: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{sec\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 1	168
Gráfica 5.17: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 1.....	168
Gráfica 5.18: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 1	169
Gráfica 5.19: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{pirnx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 2.....	171

Gráfica 5.20: Curva de cruzamiento para el mínimo valor de amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x de la carga suspendida (c_{minx}) en función de la altura de suspensión para el caso 2.....	171
Gráfica 5.21: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 2.....	172
Gráfica 5.22: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{prin\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 2.....	173
Gráfica 5.23: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{sec\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 2	173
Gráfica 5.24: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 2.....	174
Gráfica 5.25: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 2	175
Gráfica 5.26: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{pirnx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 3.....	176
Gráfica 5.27: Curva de cruzamiento para el mínimo valor de amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x de la carga suspendida (c_{minx}) en función de la altura de suspensión para el caso 3.....	176
Gráfica 5.28: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 3.....	177
Gráfica 5.29: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{prin\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 3.....	178
Gráfica 5.30: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{sec\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 3	178
Gráfica 5.31: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 3.....	179
Gráfica 5.32: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 3	180
Gráfica 5.33: Desplazamiento inicial del centro de masa de la carga suspendida respecto a la posición con los cables sin tensionar (Δx_{CM0}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4.....	181
Gráfica 5.34: Giro inicial de la carga suspendida (θ_{CM0}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4.....	181
Gráfica 5.35: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{pirnx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4.....	182

Gráfica 5.36: Curva de cruzamiento para el mínimo valor de amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x de la carga suspendida (c_{minx}) en función de la altura de suspensión para el caso 4.....	183
Gráfica 5.37: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4.....	183
Gráfica 5.38: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{prin\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4.....	184
Gráfica 5.39: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{sec\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4	185
Gráfica 5.40: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4.....	186
Gráfica 5.41: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4	186
Gráfica 5.42: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{pirnx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 5.....	188
Gráfica 5.43: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 5.....	188
Gráfica 5.44: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{prin\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 5.....	189
Gráfica 5.45: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{sec\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 5	190
Gráfica 5.46: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 5.....	190
Gráfica 5.47: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 5	191
Gráfica 5.48: Desplazamiento inicial del centro de masa de la carga suspendida respecto a la posición con los cables sin tensionar (Δx_{CM0}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6.....	192
Gráfica 5.49: Giro inicial de la carga suspendida (θ_{CM0}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6.....	192
Gráfica 5.50: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{pirnx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6.....	193
Gráfica 5.51: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6.....	194
Gráfica 5.52: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{prin\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6.....	194

Gráfica 5.53: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{sec\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6	195
Gráfica 5.54: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6.....	196
Gráfica 5.55: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6	197
Gráfica 5.56: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{prinx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 7.....	198
Gráfica 5.57: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 7.....	198
Gráfica 5.58: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{prin\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 7.....	199
Gráfica 5.59: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{sec\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 7	200
Gráfica 5.60: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 7.....	200
Gráfica 5.61: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 7	201
Gráfica 5.62: Curva de máxima amplitud (para todos los cruzamientos simulados) del armónico secundario en referencia al desplazamiento relativo en x ($A_{prinx,max}$) en función de la altura de suspensión para el caso 1.....	203
Gráfica 5.63: Curvas de máximo valor absoluto de la amplitud (para todos los cruzamientos simulados) de los armónicos en referencia al giro ($ A_{prin/sec\theta} _{max}$) en función de la altura de suspensión y del armónico (principal o secundario) para el caso 1.....	203
Gráfica 5.64: : Curva de máxima amplitud (para todos los cruzamientos simulados) del armónico secundario en referencia al desplazamiento relativo en x ($A_{prinx,max}$) en función de la altura de suspensión para el caso 2	204
Gráfica 5.65: Curvas de máximo valor absoluto de la amplitud (para todos los cruzamientos simulados) de los armónicos en referencia al giro ($ A_{prin/sec\theta} _{max}$) en función de la altura de suspensión y del armónico (principal o secundario) para el caso 2.....	204
Gráfica 5.66: Curva de máxima amplitud (para todos los cruzamientos simulados) del armónico secundario en referencia al desplazamiento relativo en x ($A_{prinx,max}$) en función de la altura de suspensión para el caso 3.....	205
Gráfica 5.67: Curvas de máximo valor absoluto de la amplitud (para todos los cruzamientos simulados) de los armónicos en referencia al giro ($ A_{prin/sec\theta} _{max}$) en función de la altura de suspensión y del armónico (principal o secundario) para el caso 3.....	205

Gráfica 5.68: Curvas de máximo periodo de los armónicos de entre todos los cruzamientos simulados ($P_{\text{prin/sec.max}}$) en función de la altura de suspensión y del armónico (principal o secundario) para el caso 1.....	206
Gráfica 5.69: Curvas de máximo periodo de los armónicos de entre todos los cruzamientos simulados ($P_{\text{prin/sec.max}}$) en función de la altura de suspensión y del armónico (principal o secundario) para el caso 2.....	207
Gráfica 5.70: Curvas de máximo periodo de los armónicos de entre todos los cruzamientos simulados ($P_{\text{prin/sec.max}}$) en función de la altura de suspensión y del armónico (principal o secundario) para el caso 3.....	207
Gráfica 6.71: Posición en x del punto de medida (x_{PM}) en función del tiempo para la simulación inicial	216
Gráfica 6.72: Posición relativa en y del punto de medida ($y_{\text{carro}}-y_{PM}$) en función del tiempo para la simulación inicial	216
Gráfica 6.73: Giro en x de la carga suspendida (θ_x) en función del tiempo para la simulación inicial	217
Gráfica 6.74: Giro en y de la carga suspendida (θ_y) en función del tiempo para la simulación inicial	217
Gráfica 6.75: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función del tiempo para la simulación inicial	218
Gráfica 6.76: Tensión adimensional del cable 4 (T_4^*) en función del tiempo para la simulación inicial	219
Gráfica 6.77: Tensión adimensional del cable 6 (T_6^*) en función del tiempo para la simulación inicial	219
Gráfica 6.78: Tensión adimensional del cable 2 (T_2^*) en función del tiempo para la simulación inicial	220
Gráfica 6.79: Tensión adimensional del cable 8 (T_8^*) en función del tiempo para la simulación inicial	220
Gráfica 6.80: Tensión adimensional en el cable 8 (T_8^*) en función del parámetro d_x y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), con $d_y=100\text{ mm}$ y $d_A=1195\text{ mm}$	224
Gráfica 6.81: Posición del punto de medida de la carga suspendida en x (x_{PM}) en función del parámetro d_x y del tiempo para el caso 4, con $d_y=100\text{ mm}$ y $d_A=1195\text{ mm}$	225
Gráfica 6.82: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función del parámetro d_x y del tiempo para el caso 1, con $d_y=100\text{ mm}$ y $d_A=1195\text{ mm}$	225
Gráfica 6.83: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función del parámetro d_y y del tiempo para el caso 1 (carga centrada), con $d_x=0\text{ mm}$ y $d_A=1195\text{ mm}$	226
Gráfica 6.84: Desplazamiento en x del punto de medida de la carga suspendida (x_{PM}) en función del parámetro d_y y del tiempo para el caso 1 (carga centrada), con $d_x=0\text{ mm}$ y $d_A=1195\text{ mm}$	227

Gráfica 6.85: Desplazamiento en x del punto de medida de la carga suspendida (x_{PM}) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm	228
Gráfica 6.86: Giro en x de la carga suspendida (θ_x) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 7 (carga descentrada en $+x-y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm	228
Gráfica 6.87: Desplazamiento relativo en y de la carga suspendida ($y_{carro}-y_{PM}$) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 7 (carga descentrada en $+x-y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm	229
Gráfica 6.88: Giro en y de la carga suspendida (θ_y) en función del parámetro d_x y del tiempo para el caso 1 (carga centrada), con $d_A=1195$ mm y $d_y=50$ mm	231
Gráfica 6.89: Giro en y de la carga suspendida (θ_y) en función del parámetro d_x y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), con $d_A=1195$ mm y $d_y=50$ mm	231
Gráfica 6.90: Giro en x de la carga suspendida (θ_x) en función del parámetro d_y y del tiempo para el caso 2 (carga descentrada en $+y$), con $d_A=1045$ mm y $d_x=0$ mm	232
Gráfica 6.91: Desplazamiento en y de la carga suspendida (y_{PM}) en función del parámetro d_y y del tiempo para el caso 2 (carga descentrada en $+y$), con $d_A=1045$ mm y $d_x=0$ mm	232
Gráfica 6.92: Desplazamiento en y de la carga suspendida (y_{PM}) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 2 (carga descentrada en $+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm	233
Gráfica 6.93: Giro en x de la carga suspendida (θ_x) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 2 (carga descentrada en $+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm	234
Gráfica 6.94: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 2 (carga descentrada en $+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm	234
Gráfica 6.95: Desplazamiento en y de la carga suspendida (y_{PM}) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm	235
Gráfica 6.96: Giro en x de la carga suspendida (θ_x) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm	235
Gráfica 6.97: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm	236
Gráficas 6.98: De arriba abajo y de izquierda a derecha: gráfico de desplazamiento en x (x_{PM}), desplazamiento en y (y_{PM}), giro en x (θ_x), giro en y (θ_y) y giro en z (θ_z) en función del parámetro δ para el caso 1 de distribución de la carga (carga centrada) y en régimen estático.	239
Gráfica 6.99: Gráfico de tensión mínima (T_{min}^*) y máxima (T_{max}^*) adimensionales en función del parámetro δ para el caso 1 de distribución de la carga (carga centrada) y régimen estático..	240
Gráficas 6.100: De arriba a abajo, tensión adimensional en los cables 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 en función de δ y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$) y aceleración en dirección del carro.	244

Gráfica 6.101: Desplazamiento en x de la carga suspendida (x_{PM}) en función de si el sistema existe o no yugo y del tiempo para el caso 4 (carga descentrada en $+x$) y $\delta=0\text{ mm}$	248
Gráfica 6.102: Desplazamiento en x de la carga suspendida (x_{PM}) en función de si en el sistema existe o no yugo y del tiempo para el caso 2 (carga descentrada en $+y$) y $\delta=25\text{ mm}$	249
Gráfica 6.103: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función de si en el sistema existe o no yugo y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$) y $\delta=25\text{ mm}$	249
Gráfica 6.104: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función de si en el sistema existe o no yugo y del tiempo para el caso 3 (carga descentrada en $-y$) y $\delta=0\text{ mm}$	250
Gráfica 6.105: Giro en y de la carga suspendida (θ_y) en función de si en el sistema existe o no yugo y del tiempo para el caso 7 (carga descentrada en $+x-y$) y $\delta=25\text{ mm}$	250
Gráfica 6.106: Giro en y de la carga suspendida (θ_y) en función de si en el sistema existe o no yugo y del tiempo para el caso 3 (carga descentrada en $-y$) y $\delta=25\text{ mm}$	251
Gráficas 6.107: Tensión adimensional (T^*) de los cables 3, 4, 5 y 6 en función del cable y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$) y $\delta=0\text{ mm}$, sin yugo en el sistema (arriba) o con yugo (abajo).....	252
Gráficas 6.108: Tensión adimensional (T^*) de los cables que aumentan su tensión al realizar <i>skew</i> en la carga suspendida en función del cable y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$) y $\delta=25\text{ mm}$, sin yugo en el sistema (arriba) o con yugo (abajo).	253
Gráficas 6.109: Tensión adimensional (T^*) de los cables que disminuyen su tensión al realizar <i>skew</i> en la carga suspendida en función del cable y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$) y $\delta=25\text{ mm}$, sin yugo en el sistema (arriba) o con yugo (abajo).	254
Gráficas 6.110: Desplazamiento relativo en x ($x_{carro}-x_{PM}$) y giro en y (θ_y) de la carga suspendida en función de si tenemos yugo o no y del tiempo para el caso 1 (carga centrada) y $\delta=0\text{ m}$	256
Gráfica 6.111: Tensión adimensional (T^*) de los cables que aumentan su tensión al realizar <i>skew</i> en la carga suspendida en función del cable y del tiempo para el caso 8 (carga descentrada en $-x+y$) y $\delta=25\text{ mm}$, sin yugo en el sistema (arriba) o con yugo (abajo).....	257
Gráfica 6.112: Tensión adimensional (T^*) de los cables que disminuyen su tensión al realizar <i>skew</i> en la carga suspendida en función del cable y del tiempo para el caso 8 (carga descentrada en $-x+y$) y $\delta=25\text{ mm}$, sin yugo en el sistema (arriba) o con yugo (abajo).....	258
Gráfica 6.113: Tensión adimensional del cable 8 (T_8^*) en función del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), aceleración en la dirección del carro y con $d_x=0\text{ mm}$, $d_y=210\text{ mm}$, $d_A=1195\text{ mm}$ y $\delta=0\text{ mm}$	260

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Parámetros del cable que utilizaremos en las simulaciones	54
Tabla 3.2: Masas de los distintos elementos que forman el sistema (suponiendo el contenedor con carga nominal)	67
Tabla 3.3: Error aproximado cometido al aplicar la hipótesis realizada para los cables verticales para distintas alturas H de las que se suspende la carga	74
Tabla 3.4: Valores de los parámetros d_x , d_y y d_A en el conjunto de simulaciones 3D para la variación de la posición de los anclajes de los cables en el carro y el cambio rápido	96
Tabla 3.5: Resultados temporales iniciales de las simulaciones 2D	103
Tabla 3.6: Gráficas adicionales para un mejor análisis del movimiento en las simulaciones 2D	104
Tabla 3.7: Resultados a analizar en el apartado 3D	106
Tabla 5.8: Cruzamiento aproximado recomendado para distintos casos de distribución de la carga (en función de la posición en y del CM cargado el contenedor con carga nominal, además del caso de contenedor vacío) para obtener un buen comportamiento en cuanto a amplitud de los armónicos.	209
Tabla 5.9: Cables que soportan la mayor y la menor carga en las simulaciones en función del caso de distribución de la carga	210
Tabla 6.10: Variables que mejoran o empeoran al aumentar el valor de los parámetros d_x , d_y y d_A utilizados en la primera parte de las simulaciones en 3D aplicando aceleración al sistema en la dirección del carro	236
Tabla 6.11: Variables que mejoran o empeoran al aumentar el valor de los parámetros d_x , d_y y d_A utilizados en la primera parte de las simulaciones en 3D aplicando aceleración al sistema en la dirección del pórtico	237
Tabla 7.12: Costes de personal	264
Tabla 7.13: Costes de licencias y equipos informáticos	264
Tabla 7.14: Costes de impresión y papelería	265
Tabla 7.15: Suma de costes totales	265



CAPÍTULO 1

Introducción

1 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En la actualidad, el transporte de mercancías es muy importante en el entorno globalizado en el que vivimos, ya que, día tras día, incontables masas de materiales y productos son trasladadas tanto por tierra como por mar y aire de un lugar a otro del planeta.



Figura 1.1: Imagen de un puerto marítimo. Zona de transporte de contenedores.

En nuestro caso, podríamos decir que el desarrollo del presente proyecto se encuentra encuadrado dentro del transporte marítimo de mercancías, y más concretamente dentro de lo que es la manutención de contenedores en el interior de los puertos: carga y descarga de barcos, movimientos de contenedores de un punto a otro del puerto, carga de camiones, etc.

En el interior del puerto, la grúa es el principal aparato de transporte, debiendo ser capaz de trasladar contenedores de gran tonelaje (hasta alrededor de 40 t) de la forma más segura, eficiente y efectiva posible. Además, estamos en la obligación de adaptar su diseño y comportamiento a la normativa vigente en cada lugar.

Este Proyecto Final de Carrera fue propuesto por Paceco España S.A., empresa dedicada al desarrollo de proyectos especialmente orientados al ámbito de las grúas de puerto, estando integrado dentro del proceso de rediseño de la grúa de patio propia de la compañía. En concreto, será objeto del presente proyecto el estudio y análisis de un nuevo sistema de elevación de la carga, conocido como "*reeving*", a introducir en las grúas que se construyan en el futuro. Del mismo modo, estudiaremos la idea inicial sobre un sistema (nuevo también) que haga girar los contenedores en torno al eje vertical (giro en "*skew*"), compatible con el sistema en *reeving* y necesario para una mejor manipulación de los contenedores.

La principal razón por la cual se quiere introducir el sistema en *reeving*, es la simplificación del sistema de elevación de la grúa para así reducir el coste del aparato, tanto en la construcción como en el mantenimiento y en el consumo energético. Esto es debido a que, con el nuevo sistema, se eliminarían gran cantidad de elementos mecánicos presentes actualmente.

Aparte, cada vez más, se avanza hacia la automatización de estos aparatos, para lo cual se necesitan sistemas de cables bastante rígidos, que hagan el trabajo más fácil a los sistemas automáticos. En este sentido, aparentemente, el sistema en *reeving* sí parece que cumple con estas pesquisas, aunque será necesario comprobarlo en las simulaciones.

Como hemos dicho, el proyecto está especialmente dirigido a las grúas de patio, las cuales esencialmente se encargan de mover y apilar los contenedores dentro del puerto. Sin embargo, el nuevo sistema de cables también sería aplicable a otros modelos de grúa como son por ejemplo las grúas tipo *ship to shore*, utilizadas para la carga y descarga de barcos.

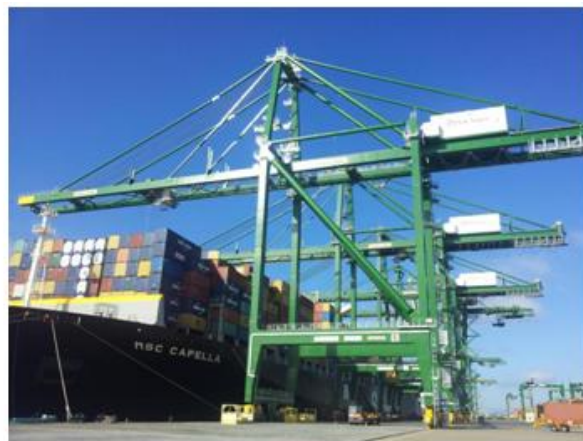


Figura 1.2: Grúa de patio (izquierda) y grúa modelo *ship to shore* (derecha)

2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal del presente proyecto es el análisis del comportamiento estático y dinámico de un sistema de elevación de cables en *reeving*, así como del sistema de giro en *skew* para la carga suspendida de una grúa de patio portuaria. El análisis se realizará mediante simulaciones en 2D y 3D, de modo que podamos recabar datos (movimientos de la carga, tensiones en los cables, etc.) y realizar un estudio de los mismos. Para ello, previamente se habrán creado modelos en 2D y 3D y una metodología de análisis que podrá ser de utilidad en trabajos futuros.

Para llegar a este objetivo principal, debemos primero alcanzar otra serie de hitos u objetivos intermedios, los cuales se detallan a continuación:

1. Se construirá un modelo en 2D del sistema, sobre el que se realizarán una serie de simulaciones, aplicando aceleración al sistema con distintos casos de distribución de la carga, alturas de las que se suspende la misma, etc.
2. En base a los resultados obtenidos del sistema en 2D de variables como giros y desplazamientos de la carga en suspensión y tensiones en los cables, se expondrán una serie de resoluciones, aplicables posteriormente a las condiciones que se impondrán en el modelo en 3D.
3. Se creará un modelo del sistema en 3D, realizando unas primeras simulaciones con las que comprobar la similitud con los resultados del sistema que se construyó en 2D (ya que en el modelo 2D será necesario realizar ciertas aproximaciones) y también ver nuevas variables de movimiento aparezcan.
4. Realizaremos una serie de simulaciones en 3D, aplicando de nuevo aceleración al sistema para distintos casos de distribución de la carga y parámetros de amarre de los cables al carro y al cambio rápido. El objetivo de estas simulaciones, será analizar comportamientos que en el sistema en 2D no podíamos apreciar y buscar valores de los citados parámetros que mejoren, en la medida de lo posible, el funcionamiento del mismo.
5. Se simulará en 3D el sistema de *skew* de la carga suspendida, para ver qué valores del parámetro que regirá el citado movimiento (el cual llamaremos δ) son necesarios para obtener los giros deseados en régimen estático. Aparte, también se investigará cuáles son las tensiones, desplazamientos, etc. del sistema cuando aplicamos aceleración al mismo, encontrándose la carga girada en *skew*.
6. Debido a que en ciertos casos del modelo 3D, previsiblemente, obtendremos un elevado desequilibrio entre las tensiones de los distintos cables, se introducirá un yugo en ciertos amarres de los mismos. Se analizará el efecto del citado elemento sobre el

sistema y se intentará verificar si con el yugo se puede, o no, regular el desequilibrio en las medidas de las tensiones en los cables, sin perjudicar en exceso los movimientos de la carga. De esta forma podremos evaluar la conveniencia de su implantación, o no, en las nuevas grúas.

Para alcanzar esta serie de objetivos, haremos uso de ciertas herramientas informáticas cuyo cometido se describe brevemente en las siguientes líneas:

- La implementación de los modelos y las simulaciones en 2D y 3D se llevará a cabo utilizando los programas *Working Model 2D* y *Working Model 3D* respectivamente.
- Haremos uso del software *Matlab* para la realización de algunos cálculos, como constantes elásticas de los cables o desplazamientos iniciales de la carga, para conseguir la posición de equilibrio estático.
- También nos serviremos del programa de análisis de señales *Sigview*, con el que extraeremos los distintos armónicos que formarán el movimiento de la carga en 2D.
- Por último, una vez obtengamos los datos de las simulaciones, con el programa *Microsoft Excel* realizaremos las transformaciones necesarias en la información extraída y construiremos las gráficas pertinentes.

Una vez alcanzados todos estos objetivos, se llegará a una serie de conclusiones finales, que servirán como base de toma de decisiones para la realización de nuevos diseños del sistema de cables *reeving* y sistema de *skew* en grúas de patio.

3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria del presente proyecto se ha estructurado en 8 capítulos y otros 8 anexos cuyo contenido se describe a continuación:

CAPÍTULO 1. Introducción

En este capítulo se incluye la justificación del proyecto, así como los objetivos del mismo y el presente apartado de estructura de la memoria.

CAPÍTULO 2. El contenedor. La grúa: partes y elementos importantes que intervienen en el proceso de transporte. El sistema de cables en *reeving* y el sistema de *skew*

Se describe el tipo de grúa para la que va orientado este proyecto (grúa de patio), así como los distintos componentes y elementos importantes a la hora de la manipulación de los contenedores. Hablaremos también del contenedor, ya que es el elemento básico sobre el que gira todo el proceso de transporte, y del sistema de cables en *reeving* y sistema de *skew*.

CAPÍTULO 3. Metodología

Se exponen los antecedentes del proyecto y las herramientas informáticas que se utilizarán. Además, se explicarán los modelos a realizar, tanto en 2D como en 3D, los resultados a obtener y el método que hemos seguido para llegar a ellos.

CAPÍTULO 4. Creación del modelo en *Working Model 2D* y *Working Model 3D*

En este capítulo se describe la forma por la cual hemos construido los modelos en 2D y 3D con los programas *Working Model 2D* y *Working Model 3D* respectivamente.

CAPÍTULO 5. Resultados de las simulaciones en 2D

Se muestran los distintos resultados de las simulaciones realizadas con el modelo en 2D, llevando a cabo una descripción y discusión de los mismos.

CAPÍTULO 6. Resultados de las simulaciones en 3D

Se exponen los resultados obtenidos en el conjunto de simulaciones en 3D, explicándolos y discutiendo sobre ellos.

CAPÍTULO 7. Presupuesto

Se realiza un estudio de los costes que supondría llevar a cabo el presente proyecto.

CAPÍTULO 8. Conclusiones y trabajos futuros

Se exponen las conclusiones a las que se llega después de la realización del proyecto y se indican algunas ideas sobre posibles trabajos que se podrían llevar a cabo, tomando como base los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 9. Bibliografía

Se muestran las distintas fuentes consultadas y tenidas en cuenta a la hora de llevar a cabo el proyecto.

ANEXOS

Se incluyen 8 anexos, en los que se expone cierta información que ha sido necesaria para la realización del proyecto. Muy brevemente, a continuación se alude al contenido de cada uno de ellos:

- Anexo I: figuras sobre el sistema actual de cables y los sistemas a implantar.
- Anexo II: ficha del tipo de cable de uso común en grúas de patio que introduciremos en nuestro modelo.
- Anexo III: programa en *Matlab* para el cálculo de ciertos parámetros necesarios en las simulaciones en 2D.
- Anexo IV: resultados de las simulaciones en 3D.



-
- Anexo V: programa en *Matlab* con el que se calculan algunos parámetros que luego serán introducidos en el modelo en 3D.
 - Anexo VI: resultados de las simulaciones en 3D en las que se lleva a cabo la variación de ciertos parámetros de amarre de los cables
 - Anexo VII: resultados de las simulaciones en 3D en las que se realiza *skew* en la carga.
 - Anexo VIII: resultados de las simulaciones en 3D para las cuales se ha introducido yugos en el sistema.



CAPÍTULO 2

**El contenedor. La grúa: partes y elementos importantes
que intervienen en el proceso de transporte. El sistema
de cables en *reeving* y el sistema de *skew***

Este Proyecto Final de Carrera está enfocado a su adecuación a los sistemas de elevación de las grúas de patio, las cuales son utilizadas para la manipulación de contenedores dentro de una terminal portuaria. Sin embargo, el diseño del sistema de cables que vamos a estudiar en este proyecto, también es aplicable a otros tipos de grúas como son las grúas *ship to shore* utilizadas para la carga y descarga de contenedores en barcos.

Debido a esto, en este capítulo nos detendremos a hablar principalmente de las grúas de patio y de los elementos que hacen posible el traslado y manipulación de los contenedores. También dedicaremos un apartado a hablar de éstos últimos, debido a su natural importancia en los procesos de transporte de mercancías.



Figura 2.3: Grúa de patio



Figura 2.4: Grúa modelo *ship to shore*

1 EL CONTENEDOR



Figura 2.5: Ejemplo de contenedor marítimo

El contenedor es el elemento central en torno al que gira todo el proceso de diseño de la grúa ya que es el habitáculo dentro del cual se aloja la mercancía a transportar.

Es un recipiente de grandes dimensiones, concebido y usado para transportar carga a través de distintos modos de transporte (transporte en barco por mar, transporte dentro de puerto con grúas, transporte por carretera...). Su función principal es la de proteger dicha carga frente a deterioros y pérdidas, desde el lugar de embalaje hasta el lugar de destino.

Todos los contenedores poseen una serie de **características principales**:

- Están principalmente fabricados en acero, y más concretamente en acero corten pintado debido a su resistencia a la corrosión. Existen contenedores fabricados en otros materiales como son el aluminio (de un elevado coste) y madera, aunque es muy raro verlos.
- Suelen tener suelo de madera, el cual posee un recubrimiento antihumedad.
- Llevan una identificación alfanumérica (regulada por la norma ISO 6346) que muestra las características del contenedor: dimensiones, tipo de carga, procedencia y propietario, etc.
- Su interior debe ser accesible de forma fácil para ser inspeccionado en las aduanas si fuera necesario.

Las medidas de los contenedores están estandarizadas según la norma ISO. Las longitudes de contenedores más usadas son 20, 40 y 45 pies aunque la norma también contempla otras longitudes como 10, 48 y 53 pies. El ancho está fijado en torno a 8 pies y el alto varía entre 8 pies y 6 pulgadas y 9 pies y 6 pulgadas.

Según su funcionalidad existen distintos **tipos de contenedores**:

- **Dry van:** contenedor cerrado y sin refrigeración. Pueden transportar casi cualquier tipo de carga, incluidas cargas delicadas. Debido a esto es el tipo de contenedor más usado.



Figura 2.6: Contenedor modelo *dry van*

- **Hard top:**
 - DE 20 PIES: son contenedores cuyo techo puede ser quitado para facilitar la operación de carga del contenedor por medio de una grúa. Utilizado especialmente para cargas altas y pesadas que puedan ser introducidas a través del techo.
 - DE 40 PIES: para cargas pesadas, altas y largas que no cabrían en un contenedor *Hard Top* de 20 pies. Las mercancías pueden ser cargadas a través del techo removido.
- **High cube:** parecidos a los *dry van* pero con mayor carga volumétrica. Especiales para cargas voluminosas como por ejemplo carbón.
- **Reefer:** contenedor refrigerado adecuado para el transporte de mercancías perecederas como pueden ser productos destinados a la alimentación.



Figura 2.7: Contenedor modelo *reefer*

- **Open top:** parecidos a los *hard top*, aunque en este caso la carga puede sobresalir por la parte de arriba del contenedor.



Figura 2.8: Contenedor modelo *open top*

- **Flat racks:** carecen de paredes laterales e incluso, en algunos casos, de paredes delanteras y traseras. Diseñados para cargas cuyas dimensiones exceden las medidas internas de los contenedores (maquinaria pesada, bobinas, troncos...).



Figura 2.9: Contenedor modelo *flat racks*

- **Open side:** son contenedores que pueden ser abiertos por uno de sus lados, por lo que son especialmente diseñados para cargar mercancías que no pueden ser introducidas por la puerta del contenedor.



Figura 2.10: Contenedor modelo *open side*

- **Tank:** contenedor cisterna diseñado para el transporte de líquidos a granel, tanto líquidos peligrosos (productos tóxicos, inflamables, corrosivos...) como líquidos con menos riesgo (leche, cerveza...). Su longitud es de 20 pies y están fabricados en acero.



Figura 2.11: Contenedor modelo *tank*

- ***Flexi-tank***: está formado por un contenedor del tipo *dry van* (normalmente de 20 pies) en cuyo interior existe un depósito flexible de polietileno (*flexibag*) de un único uso. Se utiliza para el transporte de líquidos químicos no peligrosos.



Figura 2.12: Contenedor modelo *flexi-tank*

- **Contenedor plataforma de 20 Y 40 pies**: diseñados para el transporte de carga de grandes dimensiones y elevado peso como por ejemplo maquinaria rodante.



Figura 2.13: Contenedor modelo plataforma

Para hacernos una idea del peso que pueden cargar estos contenedores, tomaremos como ejemplo los contenedores tipo *dry van*. Éstos suelen poseer una tara de entre 2 y 4 toneladas (dependiendo de su tamaño) y pueden transportar en su interior una carga de alrededor de 30 toneladas si el contenedor es de 40 pies de longitud.

Para realizar las simulaciones, en nuestro caso, usaremos contenedores que podríamos considerar del tipo *dry van* con una longitud de 40 pies, una anchura de en torno a 8 pies y una altura de alrededor de 9 pies y 6 pulgadas.

2 LA GRÚA. ELEMENTOS IMPORTANTES DENTRO DEL PROCESO DE TRANSPORTE

2.1 LA GRÚA DE PATIO

Como hemos apuntado anteriormente, pondremos especial atención sobre las grúas de patio. Estos aparatos son del tipo grúa pórtico, y se encargan de transportar y manipular contenedores dentro de las terminales portuarias.

Este tipo de grúas son capaces de mover el contenedor en 3 direcciones distintas:

- **Movimiento longitudinal:** se realiza al nivel del suelo a través de unos conjuntos de rodadura situados en las partes inferiores de los postes. Según el elemento sobre el que rueda la grúa se pueden distinguir 2 subtipos de grúas pórtico:
 - RMG (*rail mounted gantry*): la rodadura se produce sobre un carril metálico.
 - RTG (*rubber tired gantry*): la grúa está equipada con neumáticos que ruedan directamente sobre el suelo.



Figura 2.14: Grúa de patio modelo RMG (izquierda) y grúa de patio modelo RTG (derecha)

- **Movimiento transversal:** se lleva a cabo en la viga puente por medio del desplazamiento del carro, el cual se mueve sobre unos carriles metálicos dispuestos a tal efecto.
- **Movimiento de elevación:** se realiza a través del mecanismo de elevación, también dispuesto en el carro.

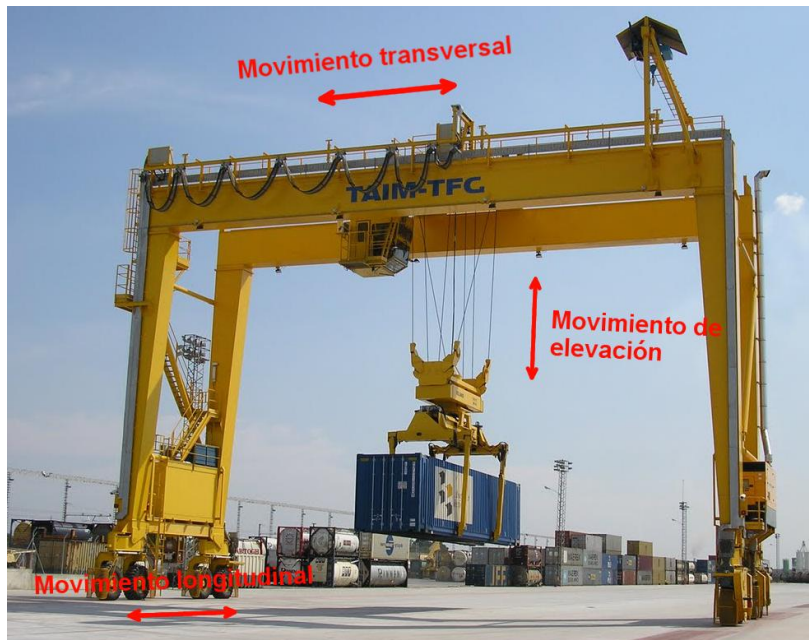


Figura 2.15: Dirección de los distintos movimientos de la grúa

Las principales partes de la grúa vienen indicadas en la **Figura 2.16** y nombradas a continuación.

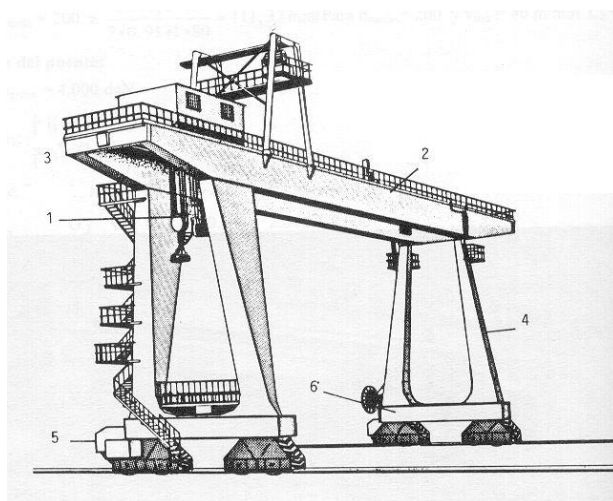


Figura 2.16: Numeración de las distintas partes de una grúa pórtico [1]

1. Mecanismo de elevación
2. Viga puente o principal
3. Traviesa
4. Poste o pata
5. Conjunto de traslación
6. Testero

2.2 ELEMENTOS IMPORTANTES DENTRO DEL PROCESO DE TRANSPORTE

2.2.1 CARRO

Componente de la grúa encargado del movimiento transversal de la carga. Se desplaza sobre unos carriles situados en la viga puente.

En general, en el carro también se encuentran elementos tales como la cabina en la que el operario maneja la grúa, el tambor y las poleas que forman parte del mecanismo de elevación de la carga así como los motores gracias a los cuales se llevan a cabo los movimientos transversal y de elevación.



Figura 2.17: Situación del carro dentro de una grúa de patio

2.2.2 CABLES

Como órganos flexibles de las máquinas para elevar carga se emplean preferentemente los cables metálicos.

Un cable metálico es un elemento constituido por alambres agrupados formando cordones, que a su vez se enrollan sobre un alma formando un conjunto apto para resistir esfuerzos de extensión.

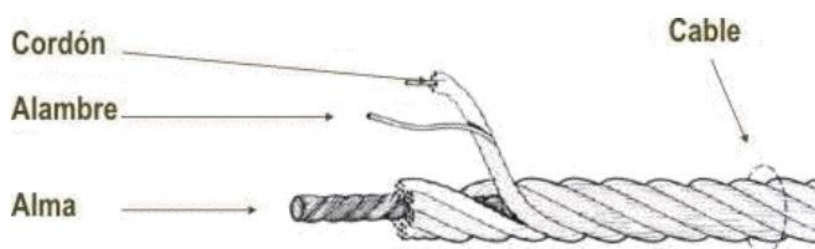


Figura 2.18: Alambre, cordón, alma y cable [2]

Los elementos que componen el cable son:

- **Alambres:** son las unidades básicas de construcción del cable. Se enrollan alrededor de un centro formando el cordón.
- **Cordones o torones:** son las estructuras más simples que se pueden construir con alambres y almas. Se forman trenzando los alambres y apoyándolos sobre un alma o bien sin alma.
- **Almas:** son los núcleos en torno a los cuales se enrollan los alambres y los cordones. La principal función del alma es proveer apoyo a los cordones para que, por ejemplo, el cable se mantenga redondo. Según el material del que esté constituido el alma distinguimos de 2 tipos:
 - **TEXTILES:** aportan flexibilidad por lo que el cable tendrá menores esfuerzos a flexión. Son menos resistentes a cargas de tracción.
 - **METÁLICAS:** menos flexibles que las anteriores por lo que el cable tendrá mayores esfuerzos a flexión. Muy resistentes a cargas de tracción.

Según la **estructura transversal de los cordones** podemos distinguir:

- **Cordones de alambres de igual diámetro:** como por ejemplo los que se muestran en la Figura 2.19.

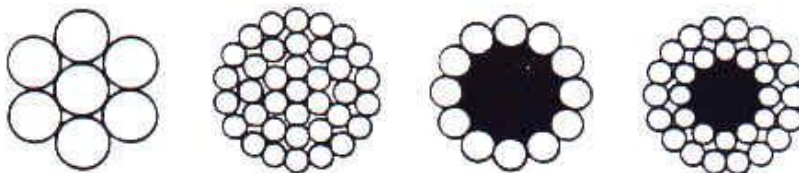


Figura 2.19: Tipos de cordones con alambres de igual diámetro [1]

- **Cordones de alambres de diferente diámetro:** distinguiremos entre los siguientes tipos:
 - **CORDÓN SEALE:** última capa con alambres de gran diámetro, por lo que posee una buena resistencia a la abrasión.



Figura 2.20: Cordón Seale [2]

- **CORDÓN FILLER O DE RELLENO (FILLER-WIRE):** posee hilos finos que rellenan huecos entre 2 capas de alambres más gruesos. Poseen buena resistencia al aplastamiento.

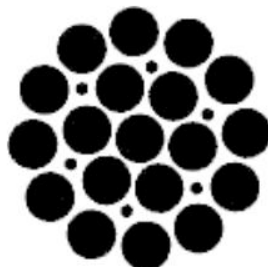


Figura 2.21: Cordón Filler o de relleno (Filler-Wire) [2]

- CORDÓN *WARRINGTON*: capa exterior con alambres de diámetros alternativos.



Figura 2.22: Cordón *Warrington* [2]

- CORDÓN *WARRINGTON-SEALE*: combinación de ambos. Conjuga las mejores características de los 2 cordones: alambres finos interiores aportan flexibilidad y la última capa de alambres gruesos aportan resistencia a la abrasión.

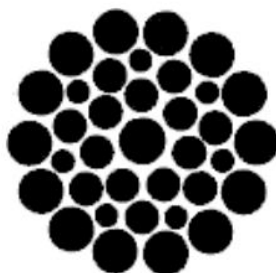


Figura 2.23: Cordón *Warrington-Seale* [2]

- **Cordones de alambre de forma especial:** a modo de ejemplo, en la **Figura 2.24** se muestran cordones con alambres en forma de x, de z o trapezoidales.



Figura 2.24: Cordones con alambres en forma de x (izquierda), de z (centro y derecha) o trapezoidales (derecha) [2]

- **Cordón de forma no circular:** como son por ejemplo los de perímetro triangular o elíptico.

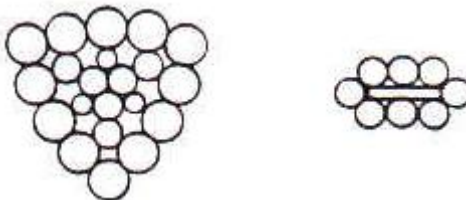


Figura 2.25: Cordones con perímetro triangular (izquierda) y elíptico (derecha) [1]

Según la **estructura transversal de los cables** podemos distinguir entre:

- **Cables monocordones:** formados por un solo cordón. Son enteramente metálicos.
- **Cables de cordones:** están formados por un conjunto de cordones. Son los más usados.
- **Cables de cabos:** formados por la agrupación de varios cables.

En cuanto a su conformación, los alambres y cordones son trenzados para formar el cable por medio de torsión. Podemos distinguir entre dos tipos de **sistemas de trenzado**:

- **Regular:** alambres retorcidos en el sentido opuesto al del cordón.
- **Lang:** alambres retorcidos en el mismo sentido que el del cordón. Resisten mejor la abrasión pero tienden a deshacerse.

Es importante también hablar de las **solicitaciones en el servicio** en los cables. Se deben considerar las siguientes:

- **Extensión:** alargamiento del cable cuando es sometido a esfuerzos de tracción. Tiene lugar por medio de tres fenómenos:
 - ELASTICIDAD DEL MATERIAL
 - ASENTAMIENTO DEL CABLE
 - EXTENSIÓN TÉRMICA

- **Encurvación:** el paso de los cables por las poleas y su enrollamiento sobre los tambores generan en estos una fatiga por flexión, tanto mayor cuanto más rígido sea el cable.
- **Aplastamiento:** se produce cuando los cables se apoyan en las gargantas de poleas y tambores, desplazándose los alambres de sus posiciones, por lo que el cable se debilita.
- **Estrepada:** son los fuertes estirones repentinos del cable que provocan en éste deformaciones respecto de su condición inicial. Los cables más apropiados para resistir este fenómeno son los *Seale* con alma metálica.
- **Abrasión:** la resistencia de un cable al desgaste es la que se opone a la abrasión. Dicho desgaste depende de la superficie de apoyo del cable y de la presión específica sobre ella.
- **Corrosión:** los alambres al aire libre requieren de protección contra este fenómeno. Para ello se suele realizar un engrase periódico de los cables o se puede usar un recubrimiento (generalmente de zinc) si la instalación es fija y de uso poco frecuente.

2.2.2.1 Cable utilizado en las simulaciones

Los cables que utilizan (y en principio utilizarán) las grúas a las que se quiere insertar el nuevo sistema *reeving* son del tipo compactado con infiltraciones plásticas. Un ejemplo de este tipo de cable sería el modelo *Turboplast* de la compañía CASAR, cuyas especificaciones se encuentran descritas en el ANEXO II. Dicho modelo de cable tendría la composición que se muestra en la **Figura 2.26**.

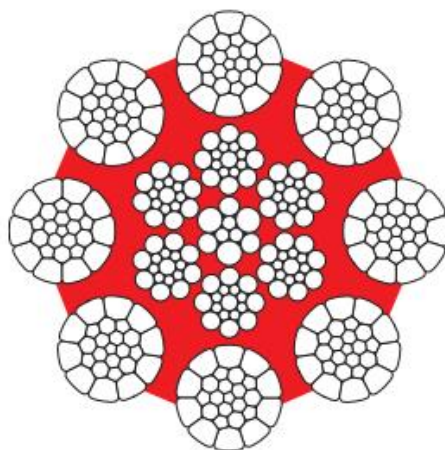


Figura 2.26: Composición del tipo cable que es utilizado en las grúas de puerto de la compañía

Vemos que se compone de 8 cordones exteriores cerrados en cuyo interior se encuentran otros 6 cordones tipo *Seale* alrededor de otro cordón interior que se podría decir que es de tipo *Warrington*.

En las simulaciones hay que tener en cuenta el alargamiento del cable debido a su elasticidad, lo cual es un factor muy importante en el sistema. Ésta será la única sollicitación de servicio que tendremos en cuenta en nuestros modelos en 2 y 3 dimensiones.

La expresión que nos marca la fuerza que realiza el cable (el cual sólo trabaja a tracción ya que a compresión no tendría ninguna tensión) es:

$$\Delta L_{elástico} = \frac{\sigma_{cable} \cdot L_0}{E_a} \Rightarrow \sigma_{cable} = \frac{\Delta L_{elástico} \cdot E_a}{L_0} \Rightarrow F_{cable} = \frac{\Delta L_{elástico} \cdot E_a \cdot S_{eff}}{L_0}$$

Donde $\Delta L_{elástico}$ es el alargamiento elástico, E_a es el módulo de elasticidad del cable en $[Pa]$, L_0 es la longitud natural de dicho cable en $[m]$, F_{cable} es la fuerza de tensión en $[N]$ y S_{eff} es la sección efectiva en $[m^2]$. Dicha sección no se corresponde con el área nominal que te facilita el fabricante (S_{nom}) sino que es el resultado de multiplicar por un coeficiente de área efectiva (C_{eff}) dicho parámetro para obtener la sección real del cable en servicio:

$$S_{eff} = S_{nom} \cdot C_{eff}$$

C_{eff} depende del tipo de cable.

Para un determinado cable, E_a y S_{eff} son constantes. De la misma manera, L_0 también es constante para una determinada altura de suspensión de la carga. Si agrupamos estos términos para un cable y altura de suspensión determinados, tendremos un término constante en la expresión que llamaremos k , y que tendrá unidades de $[N/m]$ (al igual que la constante elástica de un resorte):

$$k = \frac{E_a \cdot S_{eff}}{L_0} \Rightarrow F_{cable} = k \cdot \Delta L_{elástico}$$

De esta manera, observamos que, para un cable y altura de suspensión definidos podemos modelar la fuerza que ejerce el cable (siempre oponiéndose al alargamiento) como una constante por su alargamiento, lo que equivale a la ley de Hooke para resortes.

Simularemos por tanto los cables de nuestro sistema como resortes, pero le impondremos la condición de que dichos resortes sólo trabajen cuando se encuentran traccionados. Hay que puntualizar que el sistema 2D habrá que hacer algunas aclaraciones para la simulación de ciertos cables del sistema debido a su disposición.

Los valores de los parámetros intrínsecos del cable que usaremos en las simulaciones, los cuales nos serán necesarios para el cálculo de k , vienen reflejados en la **Tabla 2.1**.

Nombre del parámetro	Notación	Unidades	Valor
Diámetro del cable	D_r	mm	30
Módulo de Young	E_a	kg/mm^2	10150
Coefficiente de área efectiva	C_{eff}	Adimensional	0,66

Tabla 2.1: Parámetros del cable que utilizaremos en las simulaciones

2.2.3 SPREADER

Es el elemento encargado de amarrar el contenedor (por medio de los *twist-lock* de los cuales hablaremos más adelante).

Los contenedores y cajas móviles presentan como únicos puntos hábiles para su manutención los ocho vértices o “corners”, de manera que se han ideado los *spreaders* como unos sistemas de suspensión que se encaraman sobre los puntos de amarre de la carga, siendo capaces de realizar movimientos rotación y translación con rapidez y estabilidad.

Un *spreader* tiene como componentes principales los mostrados en la **Figura 2.27**, los cuales son nombrados a continuación.

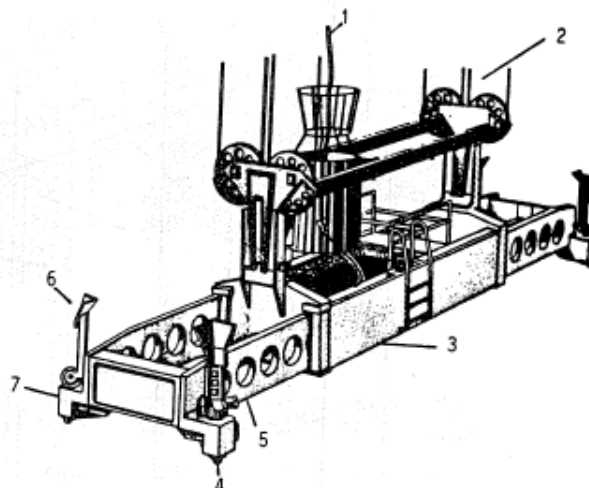


Figura 2.27: Numeración de los distintos componentes del *spreader* [1]

1. Cable de mando
2. Aparejo de elevación
3. Estructura
4. *Twist-lock*
5. Mecanismo de telescopaje
6. Mecanismo de guiado o *flippers*
7. Mecanismo de giro del *twist-lock*

Hay un componente que no se incluye en todos los aparatos pero que nosotros vamos a tener en cuenta en nuestras simulaciones, ya que es usado en la actualidad por un número elevado de grúas de la compañía. Se conoce como **cambio rápido** y se encuentra alojado entre el *spreader* y el aparejo de elevación. Su función es la de facilitar el cambio de *spreader* para hacerlo lo más rápido posible, ya sea porque hay que usar un *spreader* distinto para adaptarse a las necesidades del momento o porque dicho *spreader* esté deteriorado y haya que sustituirlo por otro en buenas condiciones.

Visto esto, pasamos a los movimientos en el propio *spreader*. En el caso general, existen 3 movimientos, todos ellos gobernados por el cable de mando:

- **Movimiento de telescopaje de largueros:** existe en aquellos *spreaders* utilizados para la manutención de contenedores de 20, 30, 35, 40 y 45 pies.
- **Movimiento de giro del mecanismo de guiado:** mediante este mecanismo se incorporan en los cuatro corners del contenedor otras tantas guías metálicas conformadas por placas plegadas a noventa grados (*flippers*) que ayudan a centrar el *spreader* sobre el contenedor a transportar.
- **Movimiento de *twist-lock*:** el giro del *twist-lock* aprisiona los 4 extremos del *spreader* en los cuatro corners superiores del contenedor.

Existen multitud de *spreaders* diferentes: desde los más simples posibles, sin telescopaje y con accionamiento manual del giro de *twist-lock*, hasta *spreaders* más complejos, con accionamientos hidráulicos o eléctricos que permiten realizar movimientos como los descritos antes. Éstos últimos son los más utilizados en el transporte *containerizado* actual.

2.2.4 *TWIST-LOCK* Y CANTONERA

El sistema de agarre de contenedores para su transporte está estandarizado y formado por 2 elementos: cantonera y *twist-lock*.

Todos los contenedores están provistos de cantoneras de hierro forjado en cada uno de sus 8 corners. Las cantoneras poseen unas aberturas en forma de muesca en 2 de sus caras laterales y en la cara superior e inferior. Para llevar a cabo el agarre del contenedor, una pieza giratoria, llamada *twist-lock*, es introducida por la abertura superior de la cantonera. Una vez introducido, se hace el girar el *twist-lock* 90°, lo que hace que dicha pieza quede fijada dentro de la cantonera, siéndole imposible salir del hueco en que ha sido introducida.

Las muescas de las caras laterales de la cantonera son para la sujeción en estiba de los contenedores durante su transporte marítimo.

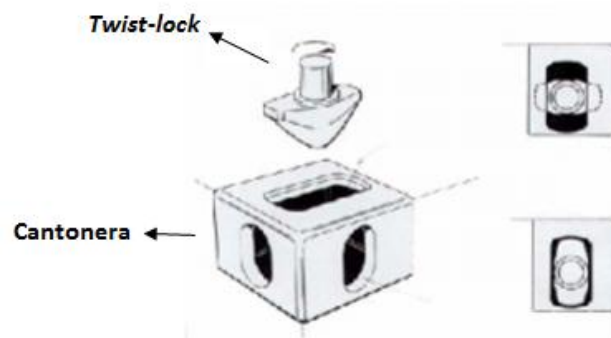


Figura 2.28: Muestra del funcionamiento de un *twist-lock*

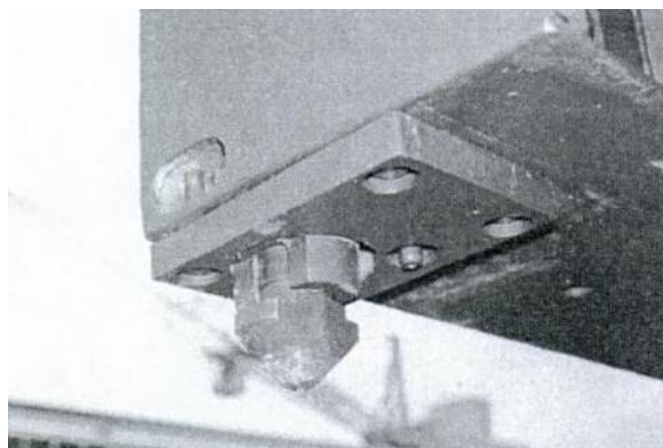


Figura 2.29: Detalle de un *twist-lock* [1]

3 EL SISTEMA DE CABLES EN *REEVING* Y EL SISTEMA DE *SKEW*

3.1 EL SISTEMA DE CABLES EN *REEVING*

Como ya se ha señalado en ocasiones anteriores, actualmente, las grúas de la compañía montan un sistema de cables bastante complicado, que cuenta con sistema de elevación y sistema “antibalanceo” activo. Dichos sistemas se quieren sustituir por otro que simplifique en gran medida la instalación.

Debido a la experiencia de la compañía en el ámbito de las grúas de puerto y al análisis de la competencia, se ha elegido implantar un sistema *reeving* en el cual se aúnen los sistemas de elevación y “antibalanceo”, que en este caso será pasivo.

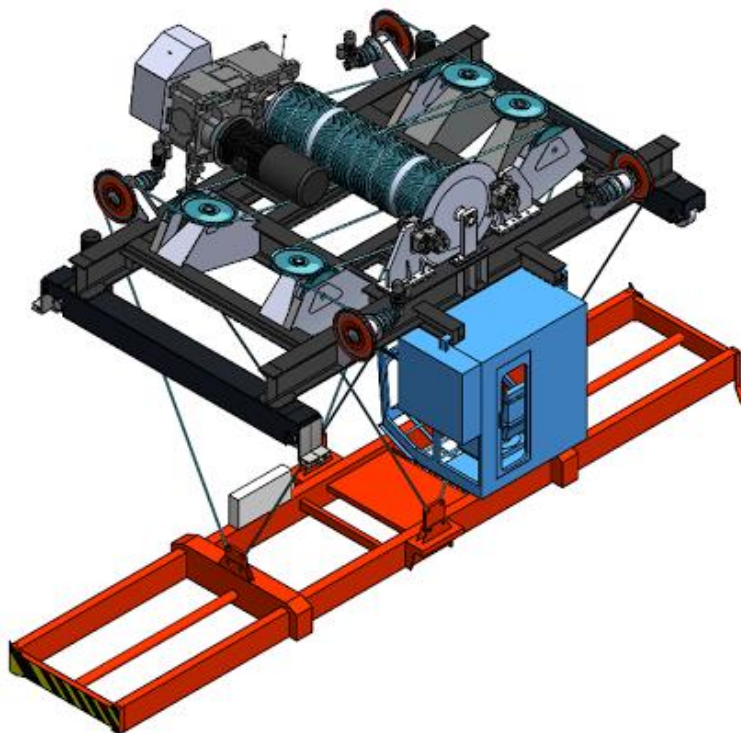


Figura 2.30: Vista isométrica de un sistema de cables en *reeving*, donde se muestran el carro y el *spreader*

El sistema *reeving* está formado por 8 cables (dos por cada lado del *spreader* y del carro) los cuales forman ángulos congruentes con la horizontal. En la **Figura 2.31** se muestra un esquema básico del citado sistema para un lado del *spreader* y del carro.

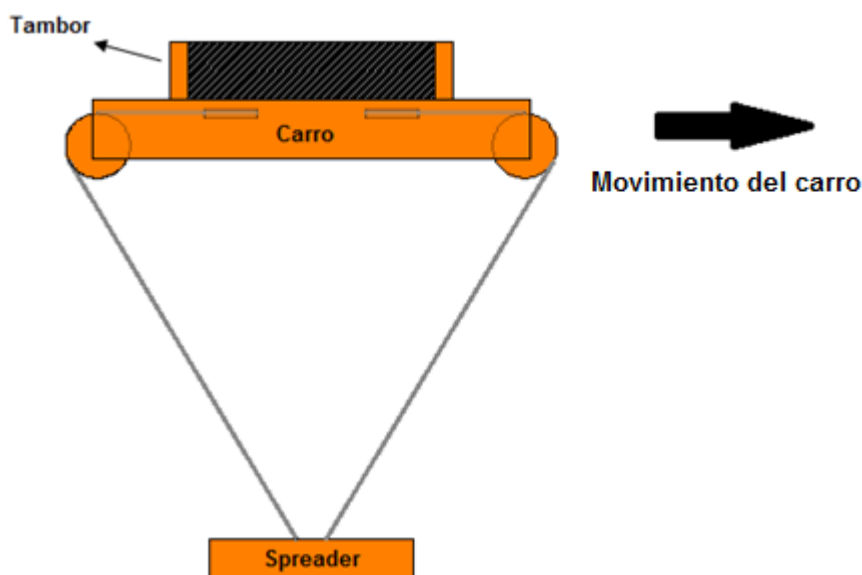


Figura 2.31: Esquema básico del sistema *reeving*

De la misma forma que ya se apuntó anteriormente, parece que nos encontramos ante un sistema con una rigidez bastante elevada, lo cual resulta beneficioso si tenemos en cuenta la tendencia a la automatización de los distintos tipos de grúas.

3.2 EL SISTEMA DE *SKEW*

Primeramente empezaremos explicando cómo se denominan los giros que tienen lugar en la carga. Distinguiremos entre 3 giros distintos: *skew*, *list* y *trim*. Sus orientaciones se muestran en la **Figura 2.32**.

Las grúas suelen tener mecanismos para realizar estos giros en la carga con la finalidad de facilitar la manipulación de los contenedores. Por ejemplo, en el Anexo I se pueden apreciar dos actuadores en el sistema de elevación de la carga que utilizan las grúas actuales de la compañía en 2 de los laterales del carro. Dichos actuadores se encargan de producir los giros *trim* y *skew*.

A nosotros, el giro que nos ocupa en este proyecto será el de *skew*, el cual hace que el contenedor gire sobre el eje vertical.

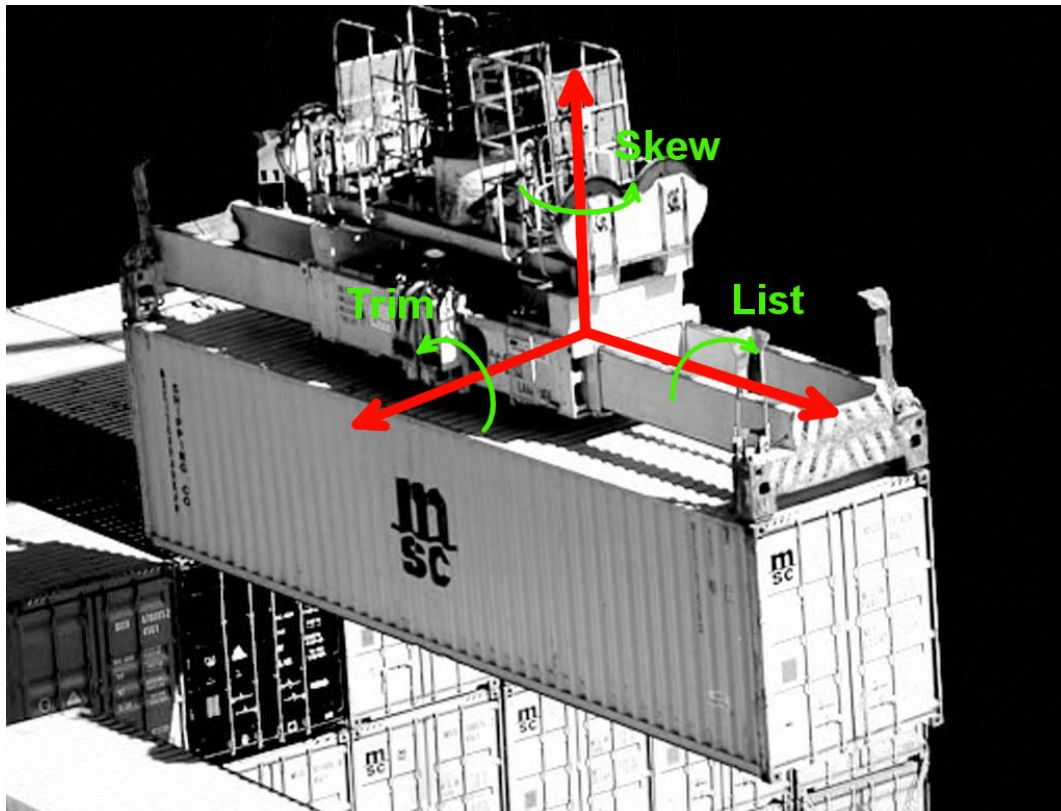


Figura 2.32: Nombre que se le da a los distintos giros que tienen lugar en un contenedor transportado por una grúa

La compañía quiere introducir un mecanismo (el cual no tiene completamente definido aún) que haga girar la carga en torno al eje vertical dentro de la configuración de cables en *reeving*. Para ello lo que se pretende es inducir un desplazamiento δ en las 4 poleas de las cuales salen los cables que van anclados a los lados más cortos del *spreader*. En las **Figuras 2.33 y 2.34** se muestran las poleas que se pretende desplazar (en verde) y la dirección del desplazamiento (en rojo) para un giro del contenedor contrario a las agujas del reloj en las vistas propuestas.

Una vez estudiado el funcionamiento del sistema con la disposición en *reeving*, analizaremos cómo afecta el desplazamiento δ a parámetros como giros en estático y dinámico de la carga, tensiones en los cables, etc. Seguidamente analizaremos dicha información, comprobando si esta idea inicial es válida, o no, para el desarrollo del sistema de *skew*.

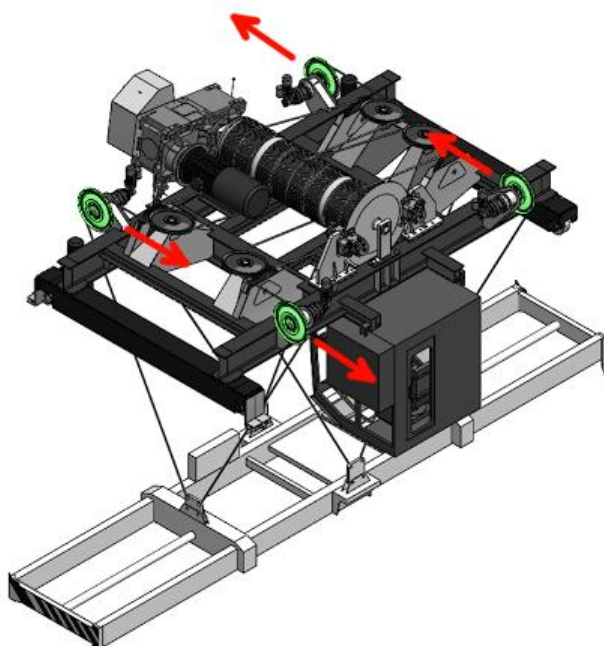


Figura 2.33: Poleas que se moverán (y sentido del movimiento de las mismas) para hacer que el contenedor gire en *skew*. Vista isométrica

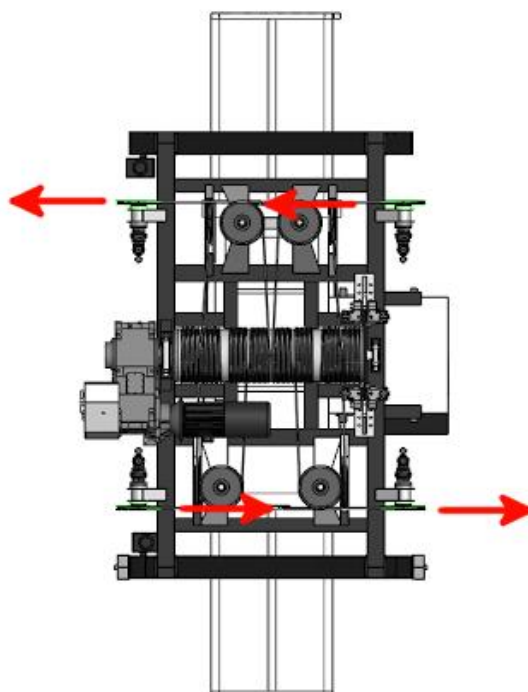


Figura 2.34: Poleas que se moverán (y sentido del movimiento de las mismas) para hacer que el contenedor gire en *skew*. Vista en planta



CAPÍTULO 3

Metodología

1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Como se dijo en capítulos precedentes, se parte de un sistema de cables que actualmente usan gran número de grúas de la compañía y que resulta bastante complejo y caro. Dicho sistema se quiere reemplazar por un sistema de cables en *reeving*, más simple, que reduzca en gran medida los costes de las nuevas grúas (ver Anexo I).

En las **Figuras 3.35 y 3.36** se muestran unos esquemas simples del sistema de cables actual, el cual consta de un mecanismo de elevación y otro “antibalanceo”.

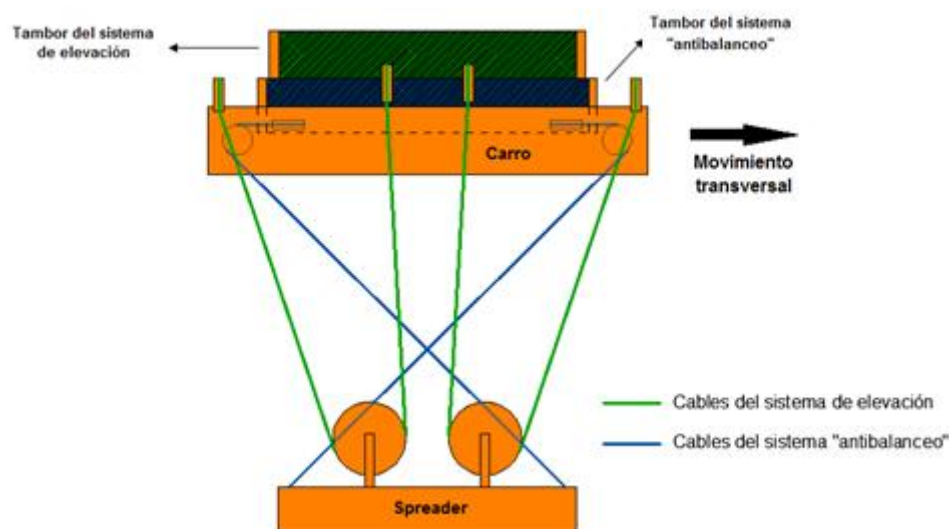


Figura 3.35: Esquema del sistema de cables actual, que consta de mecanismo de elevación y mecanismo “antibalanceo”

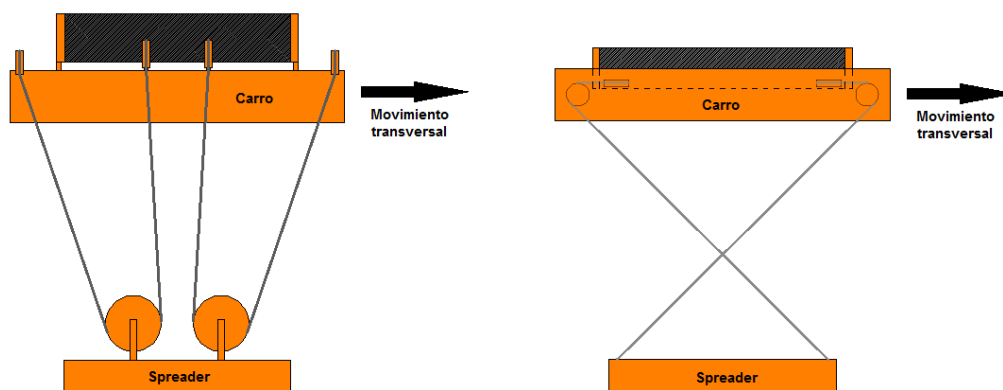


Figura 3.36: Sistema de elevación (izquierda) y “antibalanceo” (derecha) por separado

Estos dos mecanismos forman un conjunto bastante complejo, el cual consta de un total de 22 poleas y 2 tambores: 14 poleas (10 en el carro y 4 en el *spreader*) y 1 tambor en el sistema de elevación y 8 poleas (todas en el carro) y 1 tambor en el sistema “antibalanceo”.

La complejidad y el elevado número de elementos mecánicos de la instalación, repercuten en un coste bastante alto de grúa, tanto en el momento de la compra como en su mantenimiento.

Lo que se pretende es reemplazar los sistemas actuales por un único mecanismo en *reeving* que realice las funciones de elevación y “antibalanceo” y que contará con un total de 12 poleas y 1 tambor, lejos de las 22 poleas y 2 tambores de la instalación actual. El esquema básico del citado sistema se puede observar en la **Figura 3.37**.

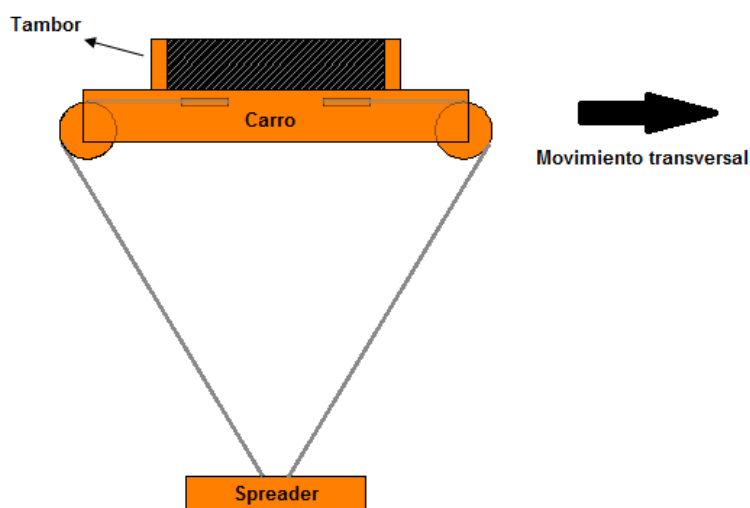


Figura 3.37: Esquema del sistema en *reeving* a implantar

Es importante decir que la compañía ya usó en los años 60 un sistema *reeving* relativamente parecido al que se desea implantar ahora. Dicho sistema, tenía la forma que se puede observar en la **Figura 3.38**.

Este mecanismo evolucionó en la siguiente década hacia otro, también en *reeving*, que incorporaba en el mismo sistema la función de elevación y la de “antibalanceo” (ver **Figura 3.39**). Éste último era de carácter activo y se situaba en el carro, estando basado esencialmente en un actuador que se movía horizontalmente.

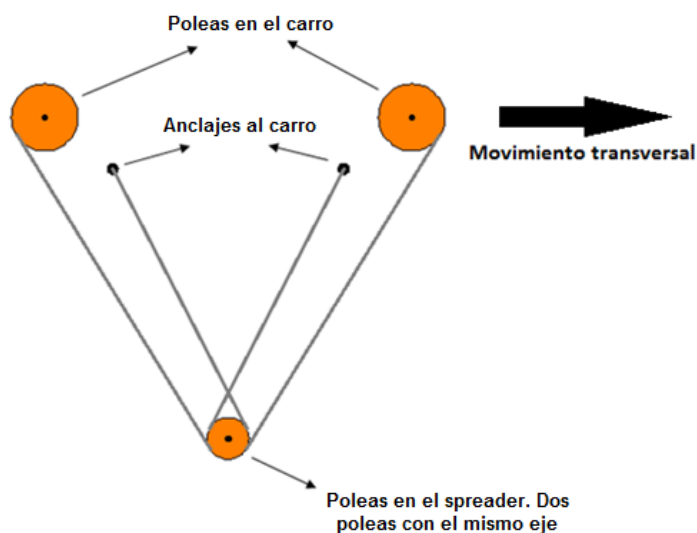


Figura 3.38: Esquema del sistema en *reeving* utilizado por Paceco en los años 60

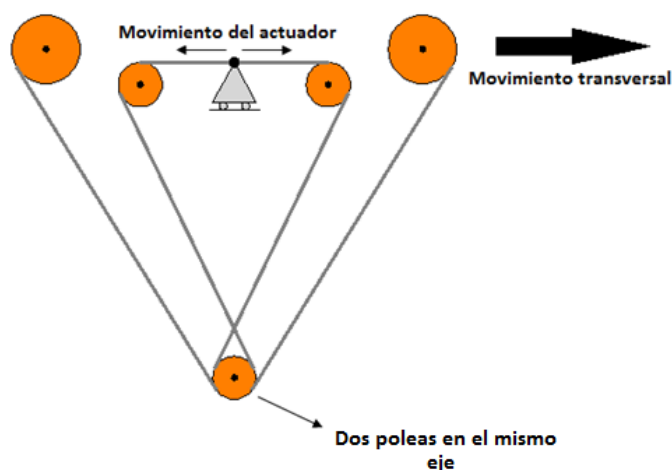


Figura 3.39: Esquema del sistema en *reeving*, evolucionado del utilizado en la década de los 60, con "antibalaceo" activo

Es por la experiencia de la compañía en este tipo de sistemas, además del estudio de los sistemas de la competencia, que ahora se quiere recuperar la configuración en *reeving*, pero en una versión mucho más simple que resulte menos costosa y al mismo tiempo eficaz.

Aparte de esto, también tendremos que analizar la funcionalidad de una idea inicial, adaptada a la configuración en *reeving* del sistema de elevación, para producir *skew* en la carga. Como ya hemos contado en otra ocasión, dicha idea, se basa en la realización de un desplazamiento δ en 4 poleas del carro, de la manera que se muestra en las Figuras 3.40 y 3.41.

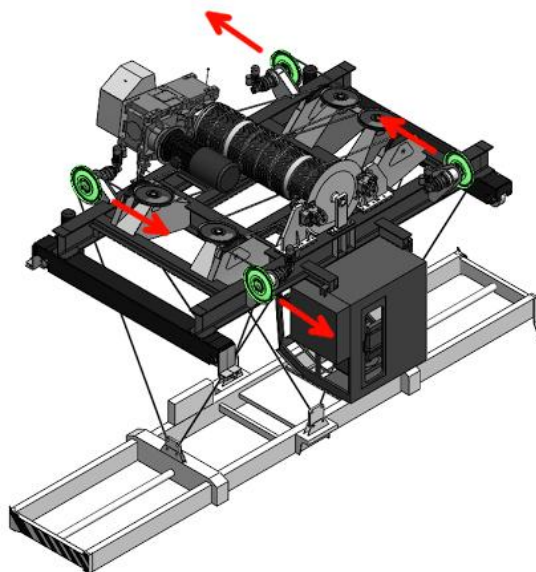


Figura 3.40: Dirección del movimiento de las poleas desplazadas (señaladas en verde) para producir *reeving* en la carga suspendida. Vista isométrica

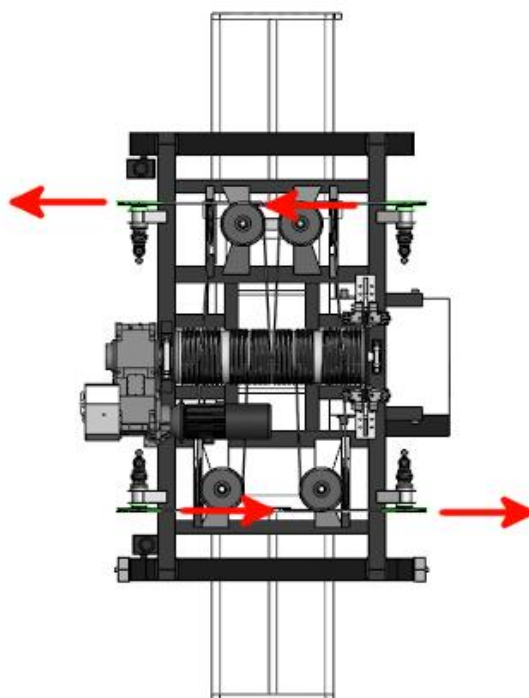


Figura 3.41: Dirección del movimiento de las poleas desplazadas (señaladas en verde) para producir *reeving* en la carga suspendida. Vista en planta

2 HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Durante la realización del proyecto, haremos uso principalmente de 2 herramientas, ambas creadas para la simulación de sistemas mecánicos reales. Dichas herramientas son **Working Model 2D** y **Working Model 3D**, utilizadas por gran cantidad ingenieros profesionales, ya que permiten acortar en gran medida el tiempo de creación de un producto, reduciendo considerablemente sus costes.

Con *Working Model 2D* llevaremos a cabo simulaciones en 2 dimensiones de nuestro sistema de grúa, lo que nos permitirá extraer una serie de datos que nos permitirán entender en primera instancia el funcionamiento del mismo.



Figura 3.42: Logotipo de *Working Model 2D*

Del mismo modo, con *Working Model 3D*, realizaremos simulaciones en 3 dimensiones del citado sistema, para obtener datos lo más reales posibles sobre su comportamiento y, de esta manera, poder mejorarlo.

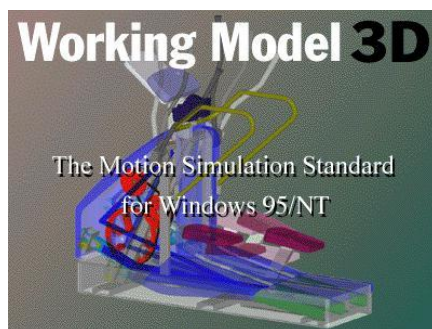


Figura 3.43: Logotipo de *Working Model 3D*

Es importante señalar que también se hará uso de otras herramientas informáticas, las cuales nos servirán de gran ayuda para la realización de algunas tareas dentro del proyecto. Dichos programas son **Matlab R2012a** (para el cálculo de constantes elásticas y longitudes iniciales de los cables), **Sigview 1.99.0** (programa orientado al estudio de señales, con el que realizar los análisis rápidos de Fourier necesarios en la parte de simulaciones en 2D) y **Microsoft Excel 2013** (para la obtención de las diferentes gráficas y resultados).

3 ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL MODELO

Tanto el modelo 2D como el 3D se compondrán de carro, cambio rápido, *spreader* y contenedor como elementos con masa, y cables como elemento cuya masa es despreciable. Es importante decir, **que para el modelo 2D utilizaremos la mitad de la masa real de los distintos elementos, además de 4 de los 8 cables que componen el modelo.** También señalamos que al conjunto cambio rápido, *spreader* y contenedor, unidos de forma rígida, lo llamaremos **carga suspendida**. Podemos ver una representación inicial de cómo serán los modelos 2D (para movimiento en la dirección del carro) y 3D en la **Figura 3.44**.

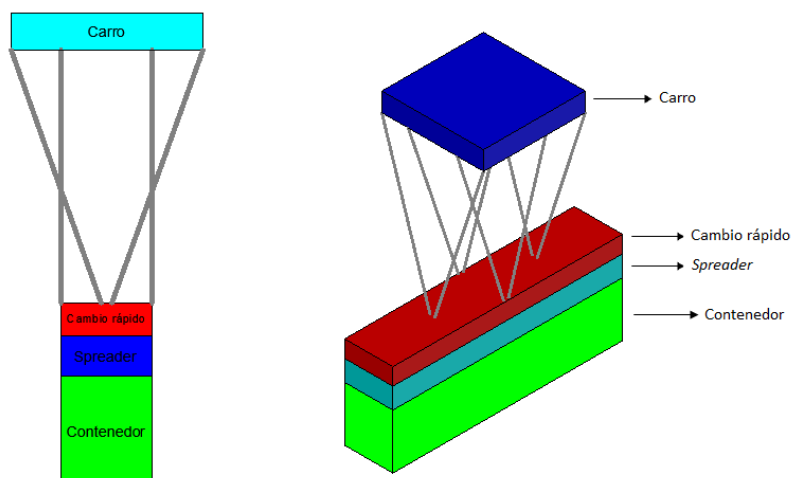


Figura 3.44: Bocetos iniciales de los sistemas en 2D (izquierda) y 3D (derecha)

El contenedor tendrá una carga nominal de 40 t y una masa en vacío de 2 t. Aparte, las masas de los distintos elementos que forman el sistema se exponen en la **Tabla 3.2**.

Elemento	Masa real, igual a la masa para el modelo 3D	Masa en el modelo 2D
Carro	$m_{carro} = 30 \text{ t}$	$m_{carro/2} = 15 \text{ t}$
Cambio rápido	$m_{cambio} = 4 \text{ t}$	$m_{cambio/2} = 2 \text{ t}$
<i>Spreader</i>	$m_{spreader} = 7 \text{ t}$	$m_{spreader/2} = 3,5 \text{ t}$
Contenedor en vacío	$m_{cont \text{ min}} = 2 \text{ t}$	$m_{cont \text{ min}/2} = 1 \text{ t}$
Contenedor con carga nominal	$m_{cont \text{ max}} = 42 \text{ t}$	$m_{cont \text{ max}/2} = 21 \text{ t}$

Tabla 3.2: Masas de los distintos elementos que forman el sistema (suponiendo el contenedor con carga nominal)

3.1 DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS DISTINTOS ELEMENTOS CON MASA DEL MODELO 2D

Construiremos un modelo en 2D para analizar el movimiento de la carga suspendida cuando se aplica una aceleración al carro en la dirección del mismo. Para el 2D únicamente moveremos el sistema en dicha dirección, puesto que es en la que la grúa de patio trabaja la mayor parte del tiempo. Es por ello, que el modelo 2D tendrá la forma que se puede apreciar en la Figura 3.44.

3.1.1 CAMBIO RÁPIDO, SPREADER Y CARRO

3.1.1.1 Modelo 2D

Simularemos el cambio rápido, el *sprader* y el carro como rectángulos con masa, la cual vendrá dada por los valores que podemos consultar en la Tabla 3.2. Dichos rectángulos tendrán densidad constante en $[kg/m^2]$ y unas dimensiones que se muestran en la Figura 3.45.

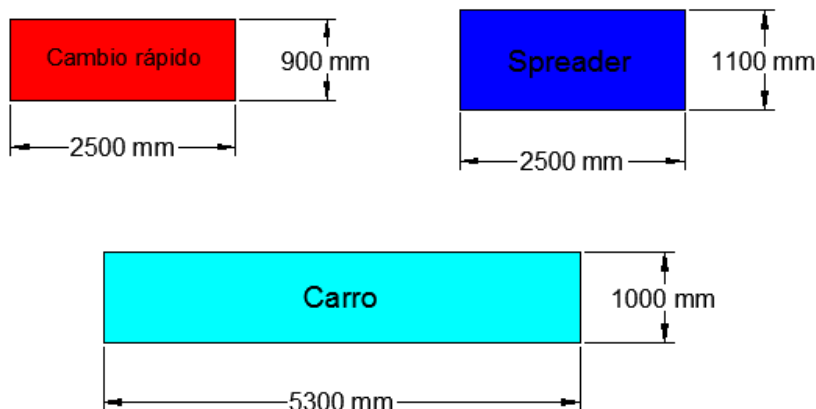


Figura 3.45: Dimensiones del cambio rápido, *sprader* y carro para el modelo 2D

3.1.1.2 Modelo 3D

Análogamente al 2D, simularemos el cambio rápido, el *sprader* y el carro como prismas rectangulares, con densidad constante en $[kg/m^3]$ y las dimensiones que se pueden observar en la Figura 3.46.

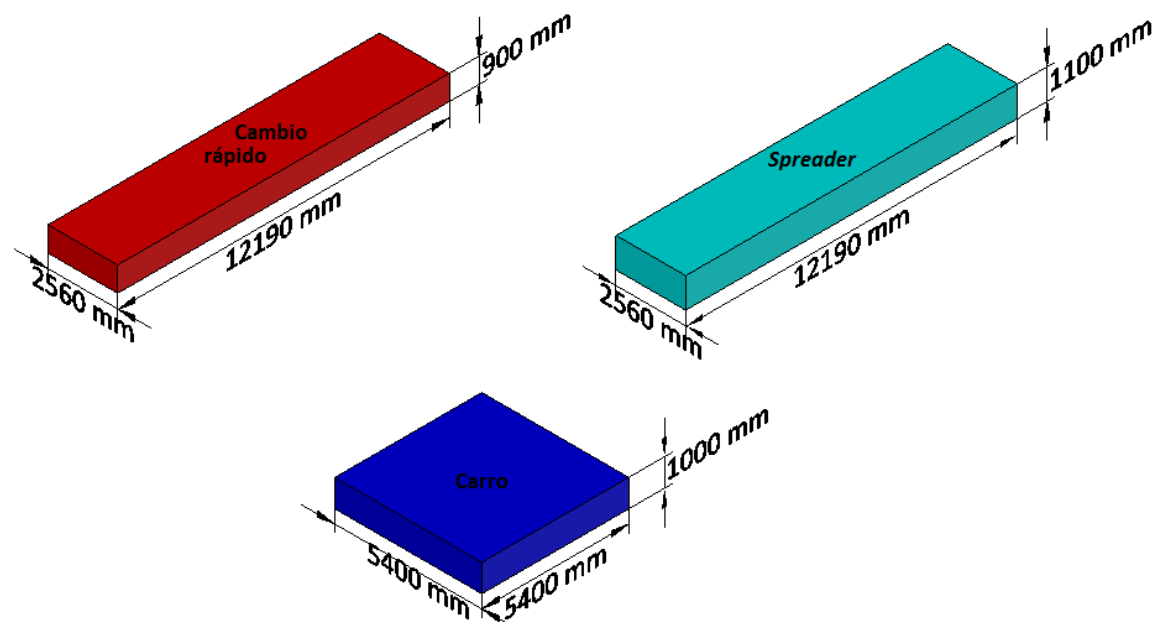


Figura 3.46: Dimensiones del cambio rápido, *spreader* y carro para el modelo 3D

El ancho de los elementos varía un poco con respecto al modelo 2D, debido a que en el modelo en 3D queremos afinar al máximo las cotas del sistema para obtener resultados lo más ajustados posible. Sin embargo, como se puede comprobar, las variaciones en las medidas son muy pequeñas.

3.1.2 CONTENEDOR

El contenedor sufrirá modificaciones con respecto a lo visto en la Figura 3.44. Lo dividiremos en varias partes, una de las cuales será utilizada para poder simular la base de dicho contenedor. Dicha base, posee la mayor parte de la masa en vacío del contenedor, debido a que cuenta con un bastidor, que proporciona la resistencia necesaria para evitar que la base se rompa a causa del peso de la carga, del apilamiento de contenedores, etc. Daremos un valor de masa real a la citada base $m_{base} = 1,6 \text{ t}$ ($m_{base/2} = 0,8 \text{ t}$ en las simulaciones en 2D), sobre el total de 2 t de masa real del contenedor en vacío.

Aparte, dividiremos el resto del contenedor en 4, si se trata del modelo 2D, u 8 partes, si se trata del modelo 3D, para poder simular cargas con distintas posiciones del centro de masa (CM).

3.1.2.1 Modelo 2D

Como hemos señalado antes, para las simulaciones en 2D dividiremos el contenedor en 5 partes: una correspondiente a la base del contenedor, con masa $m_{base/2} = 0,8 t$, y otras 4 creadas para poder introducir cargas en el contenedor con posiciones distintas del CM. Llamaremos C1, C2, C3 y C4 a dichas subdivisiones del contenedor.

Es importante decir que, cuando el contenedor se encuentra en vacío, todos los elementos C_i tendrán la misma masa (siendo válido esto también para el modelo 3D)

Las dimensiones y disposición de los distintos rectángulos que forman la representación del contenedor en 2D, vienen descritas en la **Figura 3.47**.

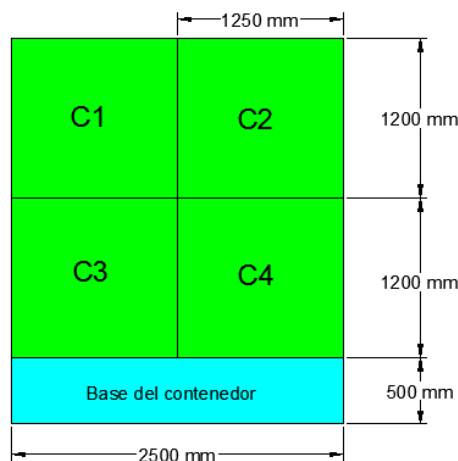


Figura 3.47: Cotas para el modelado del contenedor en *Working Model 2D*

3.1.2.2 Modelo 3D

Como hemos dicho antes, para el modelo 3D, dividiremos el contenedor en 9 partes, de forma homóloga al modelo 2D: una correspondiente a la base del contenedor y otras 8 correspondientes a los elementos C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 y C8.

La disposición y dimensiones de los distintos elementos que forman el contenedor, se pueden observar en la **Figura 3.48 y 3.49**.

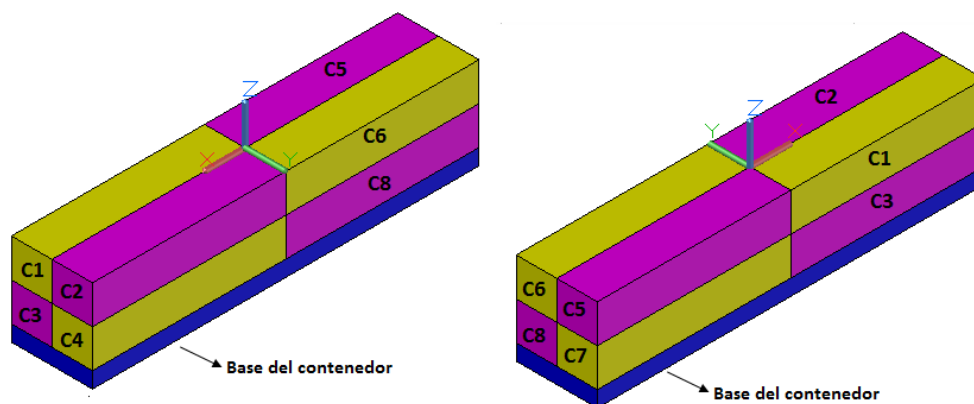


Figura 3.48: Disposición de los diferentes elementos que forman el contenedor en el modelo 3D

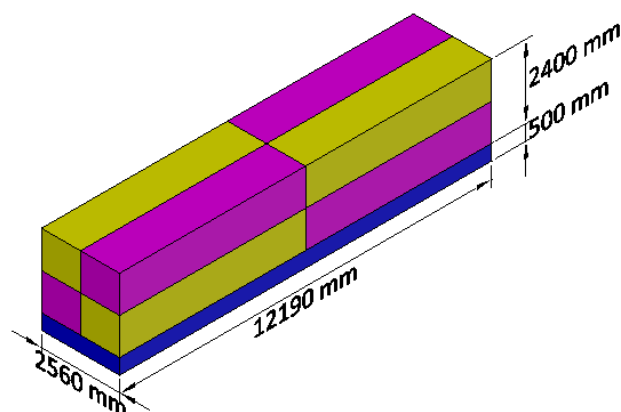


Figura 3.49: Dimensiones del contenedor en el modelo 3D

3.2 CABLES

Como se explicó en el Capítulo 2 de esta memoria, simularemos los cables a modo de resortes, imponiendo la condición de que sólo trabajen cuando se encuentren traccionados. Sin embargo, debemos hacer una pequeña puntualización sobre los cables que caen verticales en el modelo 2D.

3.2.1 ACLARACIÓN SOBRE LOS CABLES VERTICALES DEL MODELO 2D

Como se puede observar en la **Figura 3.44**, el modelo 2D consta de 4 cables: 2 que caen verticales y otros dos con una cierta inclinación. Los cables inclinados están contenidos dentro del plano en el que vamos a realizar la simulación en 2D, por lo que podríamos simularlos directamente a modo de resorte de la forma que se señaló antes. Sin embargo, en la realidad, los cables verticales no se encuentran contenidos en dicho plano, por lo que su representación corresponde a la proyección de los citados cables sobre dicho plano de simulación. Por tanto, para realizar una correcta simulación estos cables verticales, debemos ver cómo se comporta su proyección en el plano de la simulación, es decir, cómo es la componente de su fuerza en dicho plano.

Para ello, cogemos uno de los citados cables e imaginamos que se comporta como un resorte. Imaginamos también el plano en el que está contenido dicho cable, que en principio se encuentra sin alargar, por lo que no ejerce fuerza ninguna. A continuación realizamos un desplazamiento vertical δ_v al extremo inferior del cable y vemos qué fuerza es la que está ejerciendo en la proyección en el plano de simulación, la cual denotaremos como F_s (ver **Figura 3.50**).

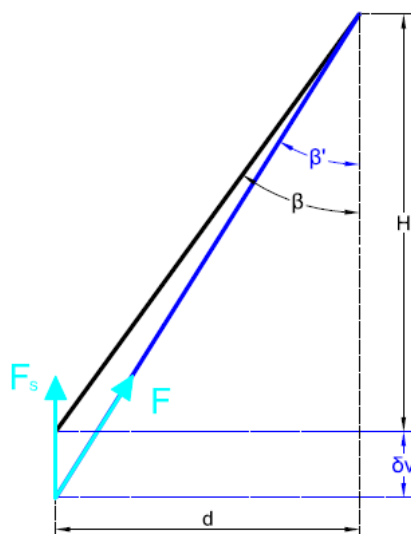


Figura 3.50: Esquema para el cálculo de la fuerza F_s

El alargamiento ΔL que se produce en el cable al realizar el desplazamiento δ_v , vendrá dado por la expresión:

$$\Delta L = L_{final} - L_{inicial} = \frac{H + \delta_v}{\cos \beta'} - \frac{H}{\cos \beta}$$

Por tanto, la proyección en el plano de la simulación de la fuerza F que ejercerá el cable, si éste se comportara como un resorte de constante elástica k , sería:

$$F_s = F \cdot \cos\beta' = k \cdot \Delta L \cdot \cos\beta' = k \left(\frac{H + \delta_v}{\cos\beta'} - \frac{H}{\cos\beta} \right) \cos\beta' = k \left(\delta_v + H \left(1 - \frac{\cos\beta'}{\cos\beta} \right) \right)$$

De la expresión anterior, se deduce que F_s no podría, en principio, modelarse como un resorte. Sin embargo, si los desplazamientos δ_v son lo suficientemente pequeños como para que los valores de ambos cosenos de la expresión anterior se aproximen bastante, entonces podremos decir lo siguiente:

$$\cos\beta' \approx \cos\beta \Rightarrow F_s = k \left(\delta_v + H \left(1 - \frac{\cos\beta'}{\cos\beta} \right) \right) \approx k \cdot \delta_v$$

Vemos que realizando la hipótesis anterior, podríamos representar los cables 1 y 4 como resortes en las simulaciones 2D, ya que la fuerza F_s se comporta como una constante elástica (que es la del resorte en cuestión) por el alargamiento en el mismo plano que contiene a dicha fuerza.

Vamos a comprobar la validez de nuestra teoría. Para ello usaremos valores aproximados de δ_v para distintas alturas, comprobando la diferencia entre F_s sin aproximar (que denotaremos como simplemente F_s) y aproximada (que denotaremos como $F_{s\text{aprox}} = k \delta_v$). Usaremos un valor $d = 2500 \text{ mm}$. Vamos por tanto dando valores orientativos a δ_v , los cuales, sacamos de la posición de equilibrio estático del sistema, igualando el peso de la carga suspendida (que denotaremos como mg) a la fuerza que ejercen los 4 cables. Supondremos un contenedor con carga nominal (40 t) y homogénea, estando, por tanto, el centro de masa de la citada carga centrada en el punto medio del ancho de la misma. Vemos que es lo que obtenemos:

$$4F_s = mg \rightarrow 4k \left(\delta_v + H \left(1 - \frac{\cos\beta'}{\cos\beta} \right) \right) = mg$$

Despejando δ_v tenemos:

$$\delta_v = \frac{mg}{4} + H \left(\frac{\cos\beta'}{\cos\beta} - 1 \right)$$

Sabemos que, además, $\cos\beta'$ viene dado por la expresión:

$$\cos\beta' = \frac{H + \delta_v}{\sqrt{d^2 + (H + \delta_v)^2}}$$

Resolvemos el sistema formado por las 2 expresiones anteriores mediante el método iterativo del punto fijo y calculamos el desplazamiento δ_v . Para ello haremos uso del un programa creado en *Matlab*.

En la **Tabla 3.3** podemos observar los valores del error aproximado que cometemos en la fuerza F_s del cable en función de la altura H .

$H \text{ (mm)}$	$\delta_v \text{ (mm)}$	$\cos\beta$	$\cos\beta'$	$error(\%) = \left \frac{F_s - F_{saprox}}{F_s} \right \cdot 100$
5000	9,77	0.89443	0.89478	24,92
8000	12,87	0.95448	0.95461	9,74
11000	16,60	0.97513	0.97520	5,15
14000	20,53	0.98443	0.98447	3,18
17000	24,56	0.98936	0.98939	2,16
20000	28,64	0.99228	0.99230	1,56

Tabla 3.3: Error aproximado cometido al aplicar la hipótesis realizada para los cables verticales para distintas alturas H de las que se suspende la carga

En la tabla antes mencionada vemos que, cuanto menor es la altura de suspensión, mayor es el error que vamos cometiendo. En la altura más baja que usaremos para las simulaciones (5000 mm), observamos que el error aproximado es de en torno al 25%.

En base a estos resultados, decidimos simular los cables verticales como si fuesen resortes, asumiendo el error antes mostrado para alturas de suspensión H menores a 8000 mm. Sin embargo, esto para nosotros no es muy preocupante, puesto que, en nuestro caso, las alturas de suspensión que más nos importa analizar se encuentran entre 11000 y 17000 mm. En dichas alturas, el error cometido es bastante aceptable. Además, la parte de simulación en 2D, será utilizada esencialmente para darnos una idea de los órdenes de magnitud de las distintas variables del sistema, así como para comprender en primera instancia el movimiento de la carga suspendida. Es por todo ello que el error cometido no nos resulta preocupante.

Todos los resortes tendrán la misma constante elástica puesto que todos los cables poseen inicialmente la misma longitud en la realidad.

4 DISPOSICIÓN DE LA CARGA

En este punto, trataremos de describir los distintos casos que hemos elegido para la distribución de la carga que habrá dentro del contenedor.

4.1 MODELO 2D

Para el cálculo del CM del contenedor en cada caso, nos valdremos del sistema de coordenadas de la **Figura 3.51**.

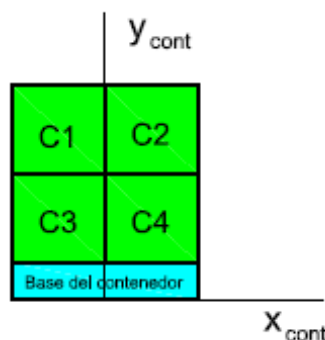


Figura 3.51: Sistema de coordenadas en ejes del contenedor para el 2D

4.1.1 PRESENTACIÓN Y CÁLCULOS PARA LOS DISTINTOS CASOS

En las simulaciones en 2D haremos uso de los casos de distribución de la carga que se enumeran a continuación, de los cuales uno es con contenedor vacío y el resto con contenedor con carga nominal:

- Caso 1: contenedor vacío
- Caso 2: carga centrada con CM alto
- Caso 3: carga centrada con CM bajo
- Caso 4: carga descentrada en $+x$ con CM alto
- Caso 5: carga descentrada en $-x$ con CM alto

- Caso 6: carga descentrada en +x con CM bajo
- Caso 7: carga descentrada en -x con CM bajo

Es importante señalar que, el descentramiento que realizará en la carga en la dirección x_{cont} , será del 10% del ancho del contenedor para los casos con carga descentrada.

Una vez visto esto, a continuación se presentan los casos antes citados y se exponen los cálculos que ha sido necesario realizar para cada uno de ellos:

- **CASO 1: contenedor vacío**

En este caso consideraremos el contenedor sin carga, vacío. De este modo, los distintos rectángulos C_i que conforman parte del contenedor tendrán la siguiente masa:

$$m_{C1} = m_{C2} = m_{C3} = m_{C4} = \frac{(1000 - 800)kg}{4} = 50 \text{ kg}$$

Lógicamente se tratará de un caso con carga centrada en x.

- **CASO 2: carga centrada con CM alto**

En esta ocasión, el contenedor estará cargado con su carga nominal (40 t en la realidad, 20 t en el 2D), además del peso propio del contenedor, teniendo todos los rectángulos C_i la misma masa. A continuación, se calcula la citada masa de los elementos C_i :

$$m_{C1} = m_{C2} = m_{C3} = m_{C4} = \frac{m_{cont+carga} - m_{base}}{4} = \frac{(21000 - 800)kg}{4} = 5050 \text{ kg}$$

Basándonos en el sistema de coordenadas visto al principio del apartado, en las cotas de los elementos y en sus respectivas masas, calculamos el CM del contenedor para el caso en el que nos encontramos:

$$x_{CMcont2} = 0$$

$$\begin{aligned} y_{CMcont2} &= \frac{m_{C1} \cdot y_{CMC1} + m_{C2} \cdot y_{CMC2} + m_{C3} \cdot y_{CMC3} + m_{C4} \cdot y_{CMC4} + m_{base} \cdot y_{CMbase}}{m_{C1} + m_{C2} + m_{C3} + m_{C4} + m_{base}} \\ &= \frac{(5050 \cdot 2300 + 5050 \cdot 2300 + 5050 \cdot 1100 + 5050 \cdot 1100 + 800 \cdot 250) \text{ kg mm}}{(5050 + 5050 + 5050 + 5050 + 800) \text{ kg}} \\ &= 1644,76 \text{ mm} \end{aligned}$$

- **CASO 3: carga centrada con CM bajo**

Para este caso, el contenedor también tendrá carga nominal, además de centrada respecto del eje x ($x_{CMcont3}=0$). Sin embargo, en esta ocasión, buscamos que el centro de gravedad esté situado más abajo en la dirección vertical que en el caso anterior.

Elegimos un valor $y_{CM3}=1100 \text{ mm}$. Con esto, y usando el sistema de coordenadas descrito al principio, calculamos los valores de las masas m_{Ci} con el sistema de ecuaciones que se muestra a continuación. Al tener carga centrada en x , las masas m_{C1} y m_{C2} deben ser las mismas, al igual que m_{C3} y m_{C4} :

$$\left\{ \begin{array}{l} 1100 \text{ mm} = \frac{(m_{C1} \cdot 2300 + m_{C2} \cdot 2300 + m_{C3} \cdot 1100 + m_{C4} \cdot 1100 + 800 \cdot 250) \text{ kg mm}}{21000 \text{ kg}} \\ m_{C1} + m_{C2} + m_{C3} + m_{C4} = 20200 \text{ kg} \\ m_{C1} = m_{C2} \\ m_{C3} = m_{C4} \end{array} \right.$$

Resolvemos el sistema y obtenemos:

$$m_{C1} = m_{C2} = 141,67 \text{ kg}$$

$$m_{C3} = m_{C4} = 9958,33 \text{ kg}$$

- **CASO 4: carga descentrada en +x con CM alto**

El contenedor estará cargado con su carga nominal. En este caso fijaremos la misma altura del centro de masa del contenedor que en el caso 2 ($y_{CMcont4}=1644,76 \text{ mm}$), pero en esta ocasión, la carga estará descentrada en el sentido positivo del eje horizontal.

Como ya se ha dicho, imponemos un descentramiento en x de la carga igual a un 10% del ancho del contenedor, por lo que la posición en x_{cont} del centro de gravedad será $x_{CMcont4}=250 \text{ mm}$. Sabiendo todo esto, calculamos el valor de las masas de los elementos C_i con el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} 250 \text{ mm} = \frac{(-m_{C1} \cdot 625 + m_{C2} \cdot 625 - m_{C3} \cdot 625 + m_{C4} \cdot 625) \text{ kg mm}}{21000 \text{ kg}} \\ m_{C1} + m_{C2} + m_{C3} + m_{C4} = 20200 \text{ kg} \\ m_{C1} = m_{C3} \\ m_{C2} = m_{C4} \end{array} \right.$$

Resolviendo el sistema tenemos:

$$m_{C1} = m_{C3} = 2950 \text{ kg}$$

$$m_{C2} = m_{C4} = 7150 \text{ kg}$$

- **CASO 5: carga descentrada en $-x$ con CM alto**

Para este caso, tendremos la misma altura vertical del centro de masa que para el caso anterior ($y_{CMcont5}=1644,76 \text{ mm}$), manteniendo el contenedor con carga nominal. También descentraremos la carga en la dirección horizontal un 10% del ancho del contenedor, salvo que esta vez lo haremos en el sentido negativo del dicho eje. De esta forma, tenemos un valor $y_{CMcont5}=-250 \text{ mm}$. Al cambiar únicamente esto, podemos calcular de forma inmediata los valores de las masas de los elementos C_i:

$$m_{C1} = m_{C3} = 7150 \text{ kg}$$

$$m_{C2} = m_{C4} = 2950 \text{ kg}$$

- **CASO 6: carga descentrada en $+x$ con CM bajo**

De nuevo, tenemos el contenedor con carga nominal. El valor vertical de la posición del centro de masa del mismo será el que se utilizó en el CASO 3 ($y_{CMcont6}=1100 \text{ mm}$). La carga estará descentrada en dirección vertical en sentido positivo del eje horizontal ($x_{CMcont6}=250 \text{ mm}$).

Fijaremos las masas de los elementos C1 y C2 como $m_{C1}=m_{C2}=141,67 \text{ kg}$ y, a continuación, calcularemos las masas de los elementos C3 y C4 con el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} 250 \text{ mm} = \frac{(-m_{C1} \cdot 625 + m_{C2} \cdot 625 - m_{C3} \cdot 625 + m_{C4} \cdot 625) \text{ kg mm}}{21000 \text{ kg}} \\ m_{C1} + m_{C2} + m_{C3} + m_{C4} = 20200 \text{ kg} \\ m_{C1} = m_{C2} = 141,67 \text{ kg} \end{array} \right.$$

De este modo obtenemos:

$$m_{C1} = m_{C2} = 141,67 \text{ kg}$$

$$m_{C3} = 5758,33 \text{ kg}$$

$$m_{C4} = 14158,33 \text{ kg}$$

- **CASO 7: carga descentrada en -x con CM bajo**

En esta ocasión, al igual que en el CASO 6, tendremos el contenedor con carga nominal y el centro de masa a una distancia vertical $y_{CMcont7}=1100 \text{ mm}$. La carga también estará descentrada en dirección horizontal, pero en este caso en sentido negativo, por lo que $x_{CMcont7}=-250 \text{ mm}$.

Con todo esto, podemos calcular las masas de los rectángulos C_i de forma inmediata:

$$m_{C1} = m_{C2} = 141,67 \text{ kg}$$

$$m_{C3} = 14158,33 \text{ kg}$$

$$m_{C4} = 5758,33 \text{ kg}$$

4.1.2 RESUMEN Y JUSTIFICACIÓN DE LOS DISTINTOS CASOS USADOS

- **CASO 1: contenedor vacío**

Masa de los elementos C_i :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Contenedor vacío} \\ m_{C1} = m_{C2} = m_{C3} = m_{C4} = 50 \text{ kg} \end{array} \right.$$

- **CASO 2: carga centrada con CM alto**

Masa de los elementos C_i :

$$\begin{cases} \text{Contenedor con carga nominal} \\ m_{C1} = m_{C2} = m_{C3} = m_{C4} = 5050 \text{ kg} \end{cases}$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\begin{cases} x_{CMcont2} = 0 \\ y_{CMcont2} = 1644,76 \text{ mm} \end{cases}$$

- **CASO 3: carga centrada con CM bajo**

Masa de los elementos C_i :

$$\begin{cases} \text{Contenedor con carga nominal} \\ m_{C1} = m_{C2} = 141,67 \text{ kg} \\ m_{C3} = m_{C4} = 9958,33 \text{ kg} \end{cases}$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\begin{cases} x_{CMcont3} = 0 \\ y_{CMcont3} = 1100 \text{ mm} \end{cases}$$

- **CASO 4: carga descentrada en +x con CM alto**

Masa de los elementos C_i :

$$\begin{cases} \text{Contenedor con carga nominal} \\ m_{C1} = m_{C3} = 2950 \text{ kg} \\ m_{C2} = m_{C4} = 7150 \text{ kg} \end{cases}$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\begin{cases} x_{CMcont4} = 250 \text{ mm} \\ y_{CMcont4} = 1644,76 \text{ mm} \end{cases}$$

- **CASO 5: carga descentrada en $-x$ con CM alto**

Masa de los elementos C_i :

$$\begin{cases} \text{Contenedor con carga nominal} \\ m_{C1} = m_{C3} = 7150 \text{ kg} \\ m_{C2} = m_{C4} = 2950 \text{ kg} \end{cases}$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\begin{cases} x_{CMcont5} = -250 \text{ mm} \\ y_{CMcont5} = 1644,76 \text{ mm} \end{cases}$$

- **CASO 6: carga descentrada en $+x$ con CM bajo**

Masa de los elementos C_i :

$$\begin{cases} \text{Contenedor con carga nominal} \\ m_{C1} = m_{C2} = 141,67 \text{ kg} \\ m_{C3} = 5758,33 \text{ kg} \\ m_{C4} = 14158,33 \text{ kg} \end{cases}$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\begin{cases} x_{CMcont6} = 250 \text{ mm} \\ y_{CMcont6} = 1100 \text{ mm} \end{cases}$$

- **CASO 7: carga descentrada en $-x$ con CM bajo**

Masa de los elementos C_i :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Contenedor con carga nominal} \\ m_{C1} = m_{C2} = 141,67 \text{ kg} \\ m_{C3} = 14158,33 \text{ kg} \\ m_{C4} = 5758,33 \text{ kg} \end{array} \right.$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{CMcont7} = -250 \text{ mm} \\ y_{CMcont7} = 1100 \text{ mm} \end{array} \right.$$

Trabajaremos entonces con contenedor vacío (caso 1) o contenedor con carga nominal (casos 2 al 7). Para los casos en los que tenemos carga nominal, hemos elegido las disposiciones de carga antes mencionadas para tener en cuenta un abanico bastante amplio de posiciones del centro de masa: más arriba o más abajo y más a la derecha o más a la izquierda. Esto se verá mejor con la **Figura 3.52**, en la que CM_i representará la posición del centro de masa del contenedor del caso i .

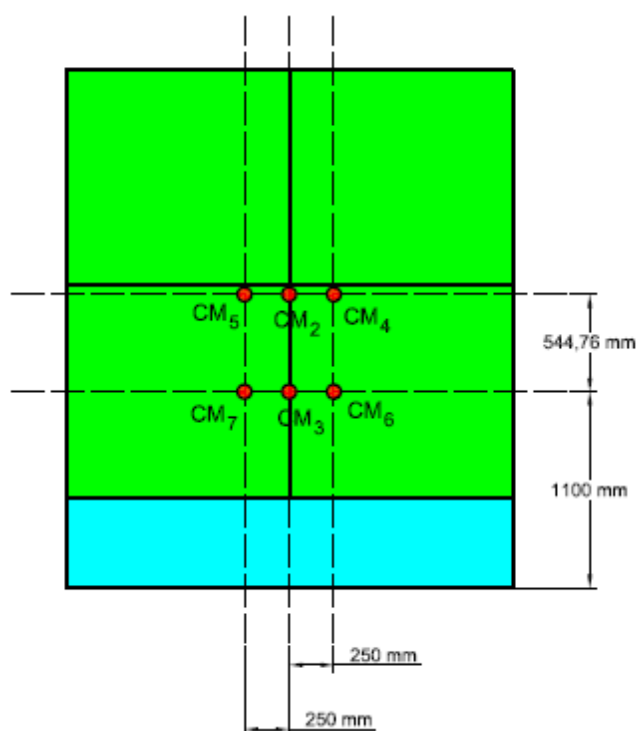


Figura 3.52: Posición del centro de masa del contenedor en los casos en los que trabajaremos con carga nominal (casos del 2 al 6)

4.2 MODELO 3D

De manera análoga a la parte de simulaciones en 2D, tendremos en cuenta una serie de casos de disposición de la carga (carga centrada, descentrada en el eje x , descentrada en el eje y , etc.) con los que poder obtener un conjunto amplio y completo de resultados.

Basaremos la situación y el cálculo de los diferentes CM, en el sistema de coordenadas del contenedor ($x_{cont}y_{cont}z_{cont}$), cuyo origen se marca en la **Figura 3.53**. La dirección y sentido de los ejes $x_{cont}y_{cont}z_{cont}$ es la misma que la de los ejes xyz del sistema de coordenadas del modelo completo, el cual se expondrá más adelante.

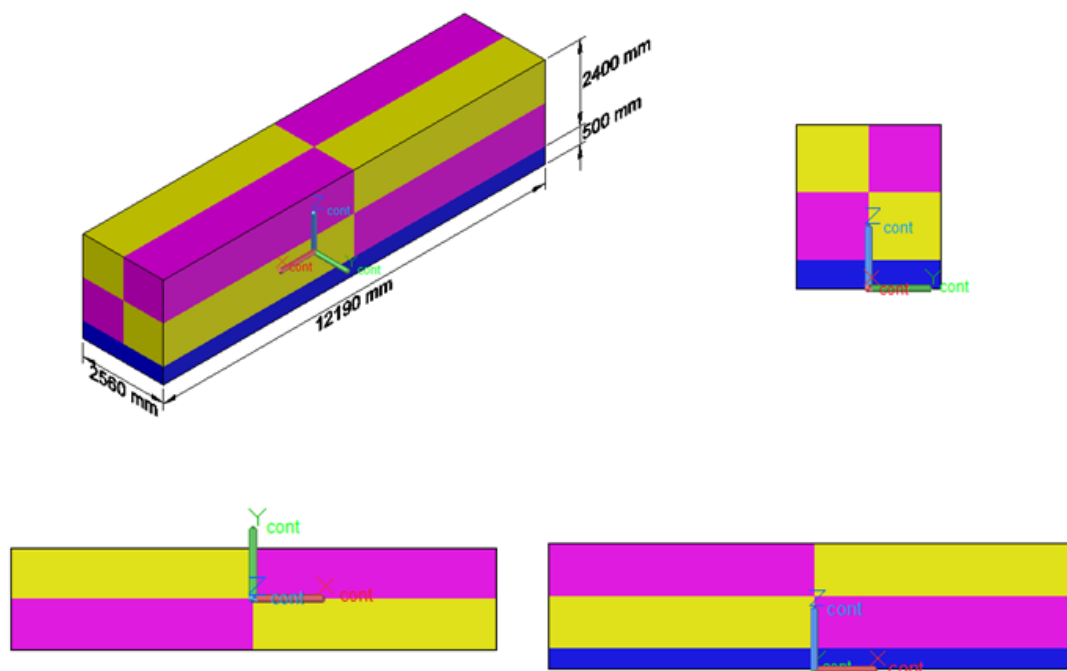


Figura 3.53: Vistas isométrica (arriba izquierda), perfil (arriba derecha), planta (abajo izquierda) y alzado (abajo derecha) del contenedor con el sistema de coordenadas propio del mismo

Para todos los casos, la altura en z_{cont} del CM será de 1644,76 mm, la misma altura de los casos de CM alto del 2D. Lo que sí variará es la posición de dicho CM en x_{cont} e y_{cont} . El igual que en el 2D, el descentramiento de la carga tendrá un valor del 10% de la longitud del contenedor en la dirección de dicho descentramiento.

Procedemos por tanto a describir los distintos casos de distribución de la carga que se utilizarán en las simulaciones.

4.2.1 PRESENTACIÓN Y CÁLCULOS PARA LOS DISTINTOS CASOS

Del mismo modo que hemos hecho en la parte 2D, comenzamos enumerando los casos de distribución de la carga que utilizaremos en las simulaciones en 3D, todos con contenedor con carga nominal:

- Caso 1: carga centrada
- Caso 2: carga descentrada en $+y$
- Caso 3: carga descentrada en $-y$
- Caso 4: carga descentrada en $+x$
- Caso 5: carga descentrada en $-x$
- Caso 6: carga descentrada en $+x+y$
- Caso 7: carga descentrada en $+x-y$
- Caso 8: carga descentrada en $-x+y$

Pasamos pues a presentar los diferentes casos enumerados antes, mostrando además los cálculos que sea necesario realizar en cada uno de ellos:

- **CASO 1: carga centrada**

Es un caso análogo al CASO 2 del apartado 2D, por lo que los valores de las masas de los distintos elementos C_i son:

$$m_{Ci} = 5050 \text{ kg} \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, 8$$

- **CASO 2: carga descentrada en $+y$**

Este caso es análogo al CASO 4 utilizado en las simulaciones en 2D. Buscamos por tanto un descentramiento de la carga en el sentido positivo de y_{cont} que suponga el 10% de la anchura del contenedor (256 mm). Para ello utilizaremos las siguientes ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} 256 \text{ mm} = \frac{(m_{C1} + m_{C3} + m_{C5} + m_{C7}) \cdot (-640 \text{ mm}) + (m_{C2} + m_{C4} + m_{C6} + m_{C8}) \cdot 640 \text{ mm}}{42000 \text{ kg}} \\ m_{C1} + m_{C2} + m_{C3} + m_{C4} + m_{C5} + m_{C6} + m_{C7} + m_{C8} = 40400 \text{ kg} \\ m_{C1} = m_{C3} = m_{C5} = m_{C7} \\ m_{C2} = m_{C4} = m_{C6} = m_{C8} \end{array} \right.$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones obtenemos:

$$m_{C1} = m_{C3} = m_{C5} = m_{C7} = 2950 \text{ kg}$$

$$m_{C2} = m_{C4} = m_{C6} = m_{C8} = 7150 \text{ kg}$$

- **CASO 3: carga descentrada en -y**

Igual que el caso anterior, salvo que ahora la carga está descentrada en el sentido opuesto del eje y_{cont} , de modo que las masas de los distintos elementos Ci son:

$$m_{C1} = m_{C3} = m_{C5} = m_{C7} = 7150 \text{ kg}$$

$$m_{C2} = m_{C4} = m_{C6} = m_{C8} = 2950 \text{ kg}$$

- **CASO 4: carga descentrada en +x**

En este caso, la carga está descentrada en dirección x_{cont} un 10% de la longitud del contenedor (1219 mm). Las ecuaciones para el cálculo de las masas de los distintos elementos Ci son:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1219 \text{ mm} = \frac{(m_{C1} + m_{C2} + m_{C3} + m_{C4}) \cdot 3047,5 \text{ mm} + (m_{C5} + m_{C6} + m_{C7} + m_{C8}) \cdot (-3047,5 \text{ mm})}{42000 \text{ kg}} \\ m_{C1} + m_{C2} + m_{C3} + m_{C4} + m_{C5} + m_{C6} + m_{C7} + m_{C8} = 40400 \text{ kg} \\ m_{C1} = m_{C2} = m_{C3} = m_{C4} \\ m_{C5} = m_{C6} = m_{C7} = m_{C8} \end{array} \right.$$

Resolviendo el sistema anterior obtenemos:

$$m_{C1} = m_{C2} = m_{C3} = m_{C4} = 7150 \text{ kg}$$

$$m_{C5} = m_{C6} = m_{C7} = m_{C8} = 2950 \text{ kg}$$

- **CASO 5: carga descentrada en $-x$**

Este caso es igual que el anterior, pero con la carga descentrada en sentido opuesto, de manera que las masas de los elementos C_i tienen los siguientes valores:

$$m_{C1} = m_{C2} = m_{C3} = m_{C4} = 2950 \text{ kg}$$

$$m_{C5} = m_{C6} = m_{C7} = m_{C8} = 7150 \text{ kg}$$

- **CASO 6: carga descentrada en $+x+y$**

En este caso, la carga estará descentrada en el sentido positivo de los ejes x_{cont} e y_{cont} . Daremos valor a las masas de 5 de los elementos C_i y, haciendo uso del sistema de ecuaciones que se muestra a continuación, calcularemos el resto de masas:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{C1} = m_{C2} = m_{C5} = m_{C6} = 5050 \text{ kg} \\ m_{C8} = 1600 \text{ kg} \\ m_{C1} + m_{C2} + m_{C3} + m_{C4} + m_{C5} + m_{C6} + m_{C7} + m_{C8} = 40400 \text{ kg} \\ m_{C1} + m_{C2} + m_{C3} + m_{C4} = 28600 \text{ kg} \\ m_{C2} + m_{C4} + m_{C6} + m_{C8} = 28600 \text{ kg} \end{array} \right.$$

Aclaremos que, las dos últimas ecuaciones del sistema anterior, son las que nos definen del descentramiento en x_{cont} e y_{cont} respectivamente. Pasamos por tanto a mostrar los valores de los elementos C_i :

$$m_{C1} = m_{C2} = m_{C5} = m_{C6} = 5050 \text{ kg}$$

$$m_{C8} = 1600 \text{ kg}$$

$$m_{C4} = 16800 \text{ kg}$$

$$m_{C7} = 100 \text{ kg}$$

$$m_{C3} = 1700 \text{ kg}$$

- **CASO 7: carga descentrada en +x-y**

Es igual que el caso anterior, salvo que ahora la carga está descentrada en el sentido negativo del eje y_{cont} . Podemos, por tanto, obtener las masas de los elementos C_i de forma inmediata, manteniendo constante m_{C1} , m_{C2} , m_{C5} y m_{C6} :

$$m_{C1} = m_{C2} = m_{C5} = m_{C6} = 5050 \text{ kg}$$

$$m_{C8} = 100 \text{ kg}$$

$$m_{C4} = 1700 \text{ kg}$$

$$m_{C7} = 1600 \text{ kg}$$

$$m_{C3} = 16800 \text{ kg}$$

- **CASO 8: carga descentrada en -x+y**

Igual que el CASO 6, pero con descentramiento en el sentido negativo del eje x_{cont} . Con esto, las masas de los distintos elementos C_i son:

$$m_{C1} = m_{C2} = m_{C5} = m_{C6} = 5050 \text{ kg}$$

$$m_{C8} = 16800 \text{ kg}$$

$$m_{C4} = 1600 \text{ kg}$$

$$m_{C7} = 1700 \text{ kg}$$

$$m_{C3} = 100 \text{ kg}$$

4.2.2 RESUMEN DE LOS DISTINTOS CASOS USADOS

- **CASO 1: carga centrada**

Masa de los elementos C_i :

$$m_{Ci} = 5050 \text{ kg} \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, 8$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\begin{cases} x_{CMcont1} = 0 \\ y_{CMcont1} = 0 \\ z_{CMcont1} = 1644,76 \text{ mm} \end{cases}$$

- **CASO 2: carga descentrada en +y**

Masa de los elementos C_i :

$$\begin{cases} m_{C1} = m_{C3} = m_{C5} = m_{C7} = 2950 \text{ kg} \\ m_{C2} = m_{C4} = m_{C6} = m_{C8} = 7150 \text{ kg} \end{cases}$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\begin{cases} x_{CMcont2} = 0 \\ y_{CMcont2} = 256 \text{ mm} \\ z_{CMcont2} = 1644,76 \text{ mm} \end{cases}$$

- **CASO 3: carga descentrada en -y**

Masa de los elementos C_i :

$$\begin{cases} m_{C1} = m_{C3} = m_{C5} = m_{C7} = 7150 \text{ kg} \\ m_{C2} = m_{C4} = m_{C6} = m_{C8} = 2950 \text{ kg} \end{cases}$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\begin{cases} x_{CMcont3} = 0 \\ y_{CMcont3} = -256 \text{ mm} \\ z_{CMcont3} = 1644,76 \text{ mm} \end{cases}$$

- **CASO 4: carga descentrada en +x**

Masa de los elementos C_i :

$$\begin{cases} m_{C1} = m_{C2} = m_{C3} = m_{C4} = 7150 \text{ kg} \\ m_{C5} = m_{C6} = m_{C7} = m_{C8} = 2950 \text{ kg} \end{cases}$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\begin{cases} x_{CMcont4} = 1219 \text{ mm} \\ y_{CMcont4} = 0 \\ z_{CMcont4} = 1644,76 \text{ mm} \end{cases}$$

- **CASO 5: carga descentrada en $-x$**

Masa de los elementos C_i :

$$\begin{cases} m_{C1} = m_{C2} = m_{C3} = m_{C4} = 2950 \text{ kg} \\ m_{C5} = m_{C6} = m_{C7} = m_{C8} = 7150 \text{ kg} \end{cases}$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\begin{cases} x_{CMcont5} = -1219 \text{ mm} \\ y_{CMcont5} = 0 \\ z_{CMcont5} = 1644,76 \text{ mm} \end{cases}$$

- **CASO 6: carga descentrada en $+x+y$**

Masa de los elementos C_i :

$$\begin{cases} m_{C1} = m_{C2} = m_{C5} = m_{C6} = 5050 \text{ kg} \\ m_{C8} = 1600 \text{ kg} \\ m_{C4} = 16800 \text{ kg} \\ m_{C7} = 100 \text{ kg} \\ m_{C3} = 1700 \text{ kg} \end{cases}$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\begin{cases} x_{CMcont6} = 1219 \text{ mm} \\ y_{CMcont6} = 256 \text{ mm} \\ z_{CMcont6} = 1644,76 \text{ mm} \end{cases}$$

- **CASO 7: carga descentrada en $+x-y$**

Masa de los elementos C_i :

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{C1} = m_{C2} = m_{C5} = m_{C6} = 5050 \text{ kg} \\ m_{C8} = 100 \text{ kg} \\ m_{C4} = 1700 \text{ kg} \\ m_{C7} = 1600 \text{ kg} \\ m_{C3} = 16800 \text{ kg} \end{array} \right.$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{CMcont7} = 1219 \text{ mm} \\ y_{CMcont7} = 256 \text{ mm} \\ z_{CMcont7} = 1644,76 \text{ mm} \end{array} \right.$$

- **CASO 8: carga descentrada en $-x+y$**

Masa de los elementos Ci :

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{C1} = m_{C2} = m_{C5} = m_{C6} = 5050 \text{ kg} \\ m_{C8} = 16800 \text{ kg} \\ m_{C4} = 1600 \text{ kg} \\ m_{C7} = 1700 \text{ kg} \\ m_{C3} = 100 \text{ kg} \end{array} \right.$$

Posición del centro de masa del contenedor:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{CMcont7} = 1219 \text{ mm} \\ y_{CMcont7} = 256 \text{ mm} \\ z_{CMcont7} = 1644,76 \text{ mm} \end{array} \right.$$

Hemos elegido esta serie de casos porque creemos que nos ofrecen alternativas suficientes para el estudio de las distintas situaciones que nos interesan en estas simulaciones. Además, decidimos no variar la altura del centro de masa en z_{cont} , ya que consideramos que el número de casos se dispararía, aparte de no tener mucha importancia en nuestro estudio en 3D.

5 POSICIÓN DE LOS ANCLAJES DE LOS CABLES, PARÁMETROS A VARIAR Y PECULIARIDADES DE CADA MODELO

5.1 MODELO 2D

En la **Figura 3.54** se puede observar la disposición definitiva de todos los elementos del sistema en el plano de representación, con su correspondiente nomenclatura y posición del origen de coordenadas (*oxy*) que usaremos en *Working Model 2D*.

En dicha figura, se muestran también los parámetros variables que tendremos en la simulación, que son la **altura de suspensión h** y el **cruzamiento c** . El resto de cotas son fijas, ya que lo que nos interesa ver en las simulaciones en 2D es cómo varía el movimiento de la carga suspendida al realizar pequeñas variaciones en el valor de c , utilizando además distintas alturas de suspensión h y diferentes distribuciones de la carga del contenedor.

A continuación, exponemos de manera más clara la definición de los parámetros antes mencionados, así como el intervalo de valores en el que se moverán:

- **Altura de suspensión h :** es la distancia vertical que separa la parte inferior del carro y la parte superior del cambio rápido, cuando los cables se encuentran en su estado natural, es decir, sin sufrir alargamiento alguno. Utilizaremos los siguientes valores para dicho parámetro: 5 m, 8 m, 11 m, 14 m, 17 m y 20 m. Como ya se ha señalado antes en este capítulo, los valores que más nos interesarán en las simulaciones serán 14 m y 17 m, que son con los que más trabaja la grúa.
- **Cruzamiento c :** es el parámetro que nos marcará donde se situarán los anclajes de los cables 2 y 3 en el cambio rápido. Dicho cruzamiento, podrá tomar valores positivos o negativos de la forma que se puede observar en la **Figura 3.55**. Tomaremos valores de c comprendidos en el intervalo entre -600 mm y 600 mm, con una diferencia de 100 mm entre valores consecutivos.

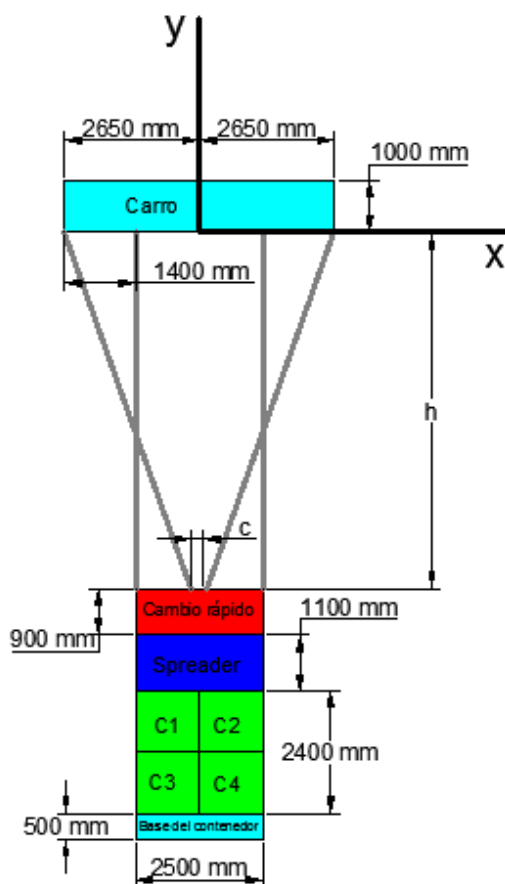


Figura 3.54: Disposición en el plano de los distintos elementos que formarán el modelo en *Working Model 2D* con sus correspondientes cotas

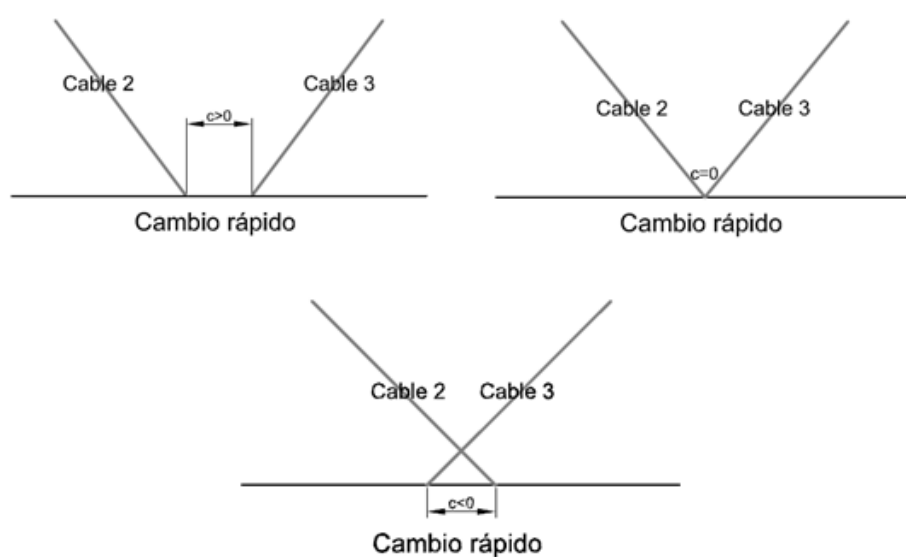


Figura 3.55: Signo del cruzamiento c

5.2 MODELO 3D

Para las simulaciones en 3D usaremos un valor constante de altura de suspensión, que será de 14 m. El cruzamiento también será constante y tomará un valor que determinaremos una vez veamos los resultados de las simulaciones en 2D, pero que adelantamos, será de 250 mm.

La posición y orientación del sistema de coordenadas xyz utilizado en las simulaciones en 3D, se exponen en la **Figura 3.56**. En dicha figura, se muestran también los nombres de los elementos C_i , para que se pueda observar cómo están dispuestos con el sistema de coordenadas utilizado.

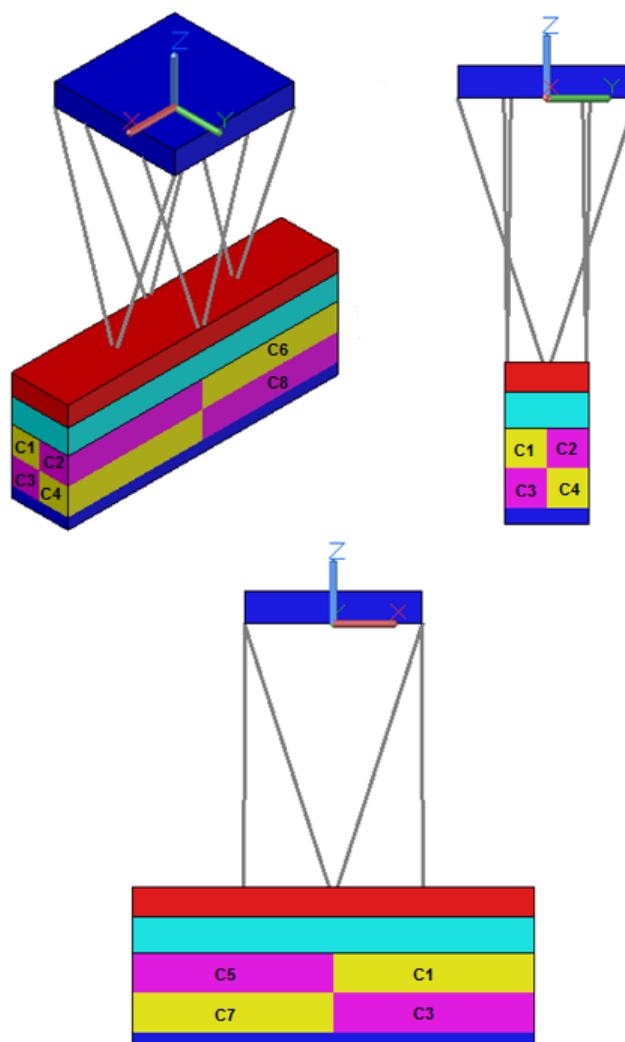


Figura 3.56: Vista isométrica (arriba a la izquierda), en perfil (arriba a la derecha) y alzado (abajo) del modelo en 3D con el sistema de coordenadas utilizado en las simulaciones

En estas simulaciones en 3D, veremos cómo afectan la variación de ciertos parámetros que modifican los anclajes de los cables al carro y al cambio rápido, además de otro parámetro con el cual induciremos un giro en *skew* en la carga suspendida. Aparte, introduciremos un elemento como el yugo en los anclajes de algunos cables al cambio rápido y veremos cómo se modifica el comportamiento del sistema con dicho elemento.

Debemos distinguir, por tanto, 3 tipos distintos de simulaciones para el modelo 3D:

- Simulaciones con parámetros para la variación de los anclajes al carro y al cambio rápido.
- Simulaciones con inducción de *skew* en la carga suspendida.
- Introducción de yugo en los anclajes de ciertos cables al cambio rápido con el objetivo de regular las tensiones del sistema.

5.2.1 SIMULACIONES CON PARÁMETROS PARA LA VARIACIÓN DE LOS ANCLAJES DE LOS CABLES AL CARRO Y AL CAMBIO RÁPIDO

En estas simulaciones variaremos una serie de parámetros que nos definen la posición de ciertos anclajes de los cables al carro y al cambio rápido.

Las medidas que tomaremos para el amarre de los cables al carro y cambio rápido, así como los parámetros que rigen la posición dichos amarres se muestran en la **Figura 3.57**, en la que se representa una vista en planta del sistema. En dicha figura se nombran los puntos de amarre de la forma “1c”, donde 1 representa el número del cable (en este caso el cable 1) y c indica si el amarre se produce en el carro o en el cambio rápido: c representa amarre en el carro y s en el cambio rápido. Como también se explicó anteriormente, el cruzamiento será fijo para todas las simulaciones en 3D (igual a 250 mm).

Recordamos que, por distintos motivos de diseño, las poleas situadas en el carro, de las que salen los cables que se anclan en los lados largos del *spreader*, no se sitúan de forma simétrica respecto del plano $x=0$ del sistema. Existe un pequeño desfase entre poleas en un lado y en otro del carro.

Esto hará que se induzcan movimientos, como es el giro en torno al eje z cuando apliquemos aceleración en la dirección del carro, aún teniendo el contenedor con carga centrada.

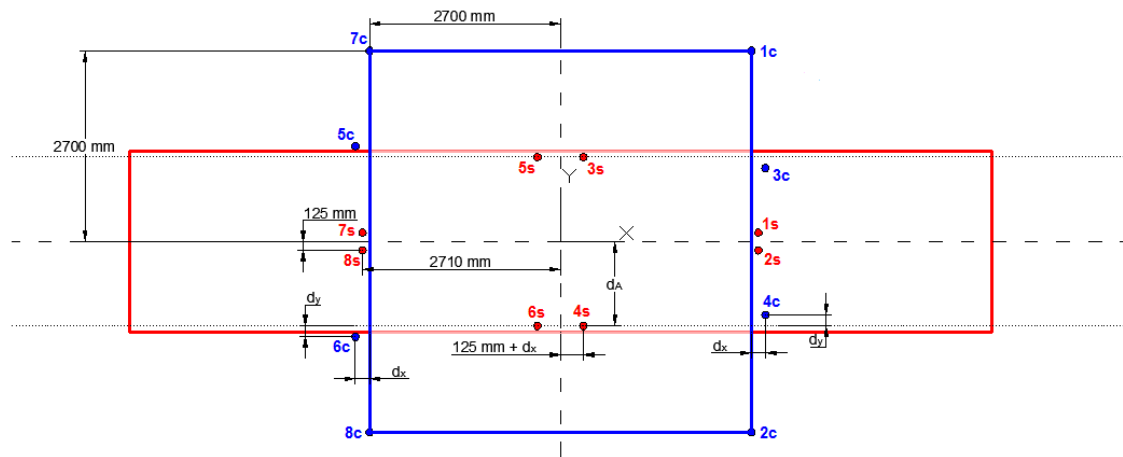


Figura 3.57: Vista en planta del sistema para la visualización de los anclajes de los cables así como los parámetros d_x , d_y y d_A

Como se puede observar en la Figura 3.57, tenemos 3 parámetros que nos marcan la posición de los anclajes de ciertos cables al carro y al cambio rápido. A continuación, mostramos, de forma más clara, que desplazamientos en los amarres de los cables se realizan con los distintos parámetros:

- **Parámetro d_x (Figura 3.58)**

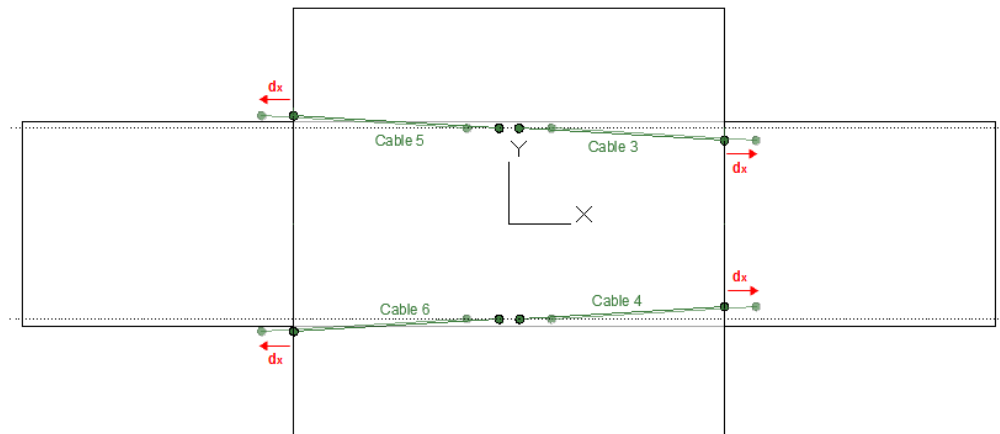


Figura 3.58: Vista en planta del sistema para aclaración del parámetro d_x

- **Parámetro d_y (Figura 3.59)**

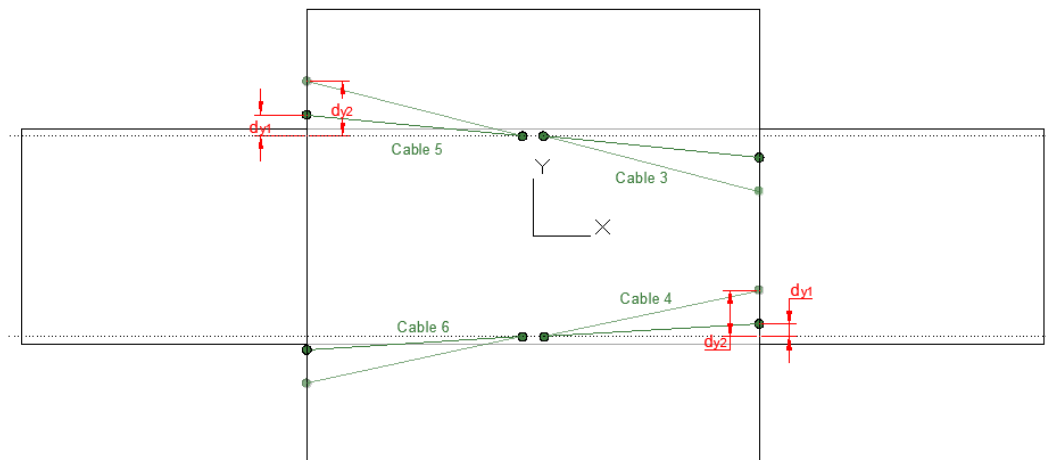


Figura 3.59: Vista en planta del sistema para aclaración del parámetro d_y

- Parámetro d_A (Figura 3.60)

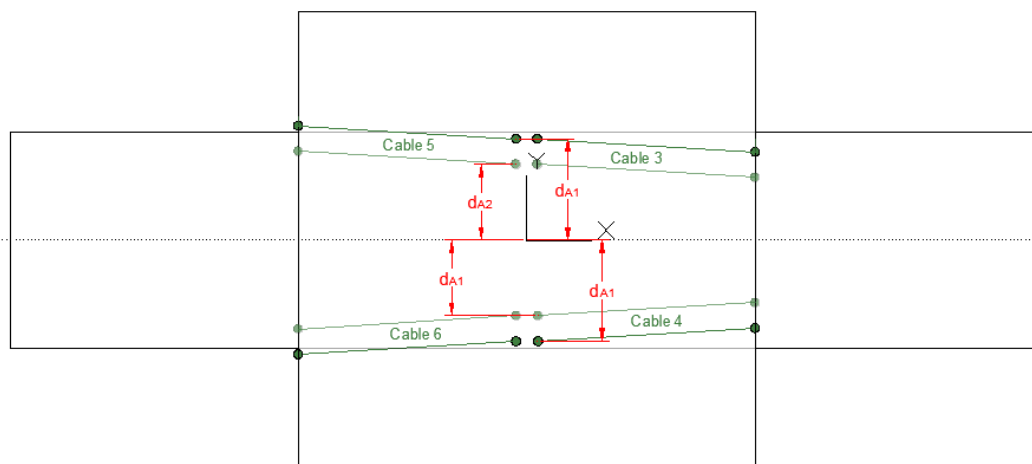


Figura 3.60: Vista en planta del sistema para aclaración del parámetro d_A

Los parámetros antes citados tomarán los valores que se muestran en la **Tabla 3.4**.

Parámetro	Valores [mm]			
d_x	0	100	200	300
d_y	50	105	150	
d_A	745	1045	1195	

Tabla 3.4: Valores de los parámetros d_x , d_y y d_A en el conjunto de simulaciones 3D para la variación de la posición de los anclajes de los cables en el carro y el cambio rápido

5.2.2 SIMULACIONES CON INDUCCIÓN DE *skew* EN LA CARGA SUSPENDIDA

En este apartado nos encargaremos de realizar *skew* en la carga suspendida, moviendo 4 poleas del carro de la forma que aparece en las **Figuras 2.33 y 2.34** del Capítulo 2. Realizaremos primeramente *skew* en estático (usando el caso con carga centrada) hasta llegar a un determinado valor de giro, que será igual a 3° . A continuación, utilizando el valor de δ encontrado, induciremos aceleración al carro, para ver cómo se comporta el sistema cuando el contenedor está girado. Usaremos los mismos casos de distribución de la carga que en el apartado anterior, para así poder comparar resultados de tensiones y movimientos.

En este apartado tomaremos valores fijos de los parámetros d_x , d_y y d_A , los cuales podemos adelantar que serán 0 mm , 105 mm y 1195 mm respectivamente. Podemos ver cómo quedan las cotas de los anclajes de los cables en la **Figura 3.61**.

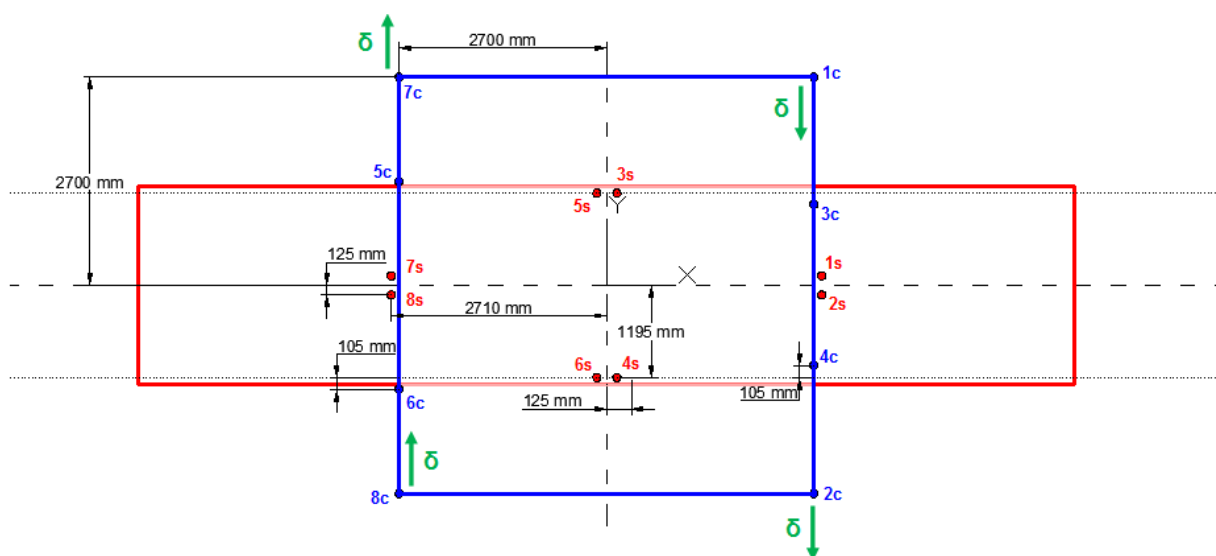


Figura 3.61: Vista en planta del sistema para la visualización de los amarres de los cables y el desplazamiento δ para realizar *skew* en la carga suspendida

En dicha figura podemos observar la dirección y sentido del desplazamiento δ que realizaremos de los anclajes de los cables 1, 2, 7 y 8 al carro, para que la carga suspendida gire en *skew*. Con dicha dirección y sentido del desplazamiento δ , la carga suspendida girará en el sentido de las agujas del reloj.

Es preciso realizar un apunte sobre la longitud de los cables que sufren el desplazamiento δ . Decidimos, en principio, considerar dichos cables en su longitud natural. En estas condiciones, al realizar el citado desplazamiento δ , la longitud de éstos en el tramo de cable a simular (desde la polea de salida del carro, hasta el anclaje del mismo al cambio rápido) cambia, lo que también modificará el valor de su constante elástica. Dependiendo del sentido del desplazamiento, dicha longitud aumentará o disminuirá un valor igual al citado desplazamiento. Podemos observar esto con mayor claridad, vamos a la **Figura 3.62**. Hay que decir también que, previsiblemente, el desplazamiento δ será muy pequeño en comparación con la longitud previa del cable. Esto hará, que, el efecto que hemos introducido respecto al cambio de longitud, sea prácticamente inapreciable.

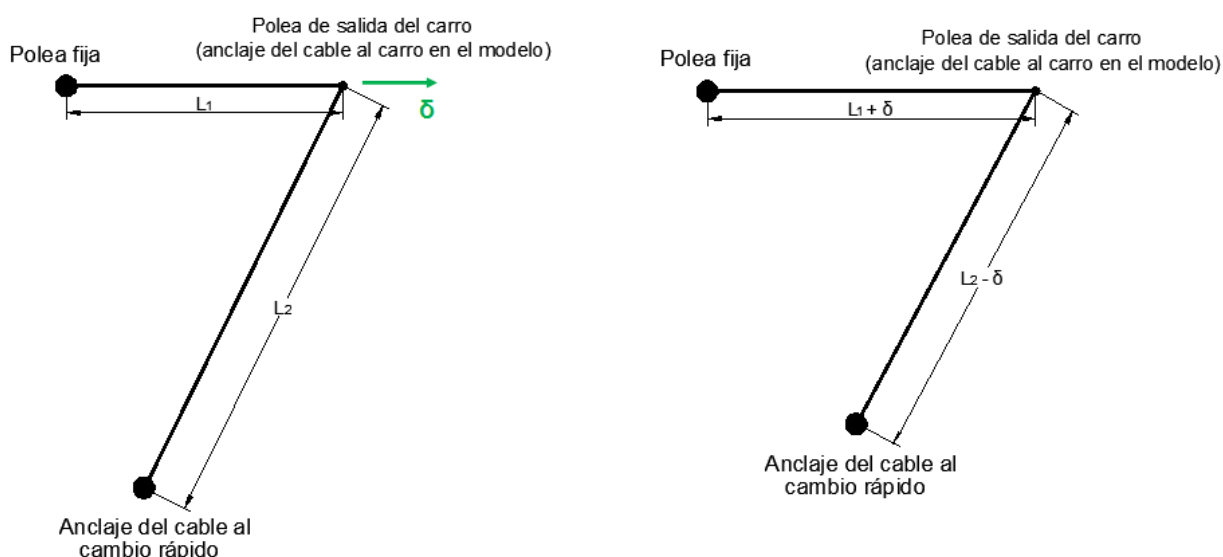


Figura 3.62: Figura para la visualización del alargamiento de los cables en el modelo debido al desplazamiento δ en la polea de salida del carro. A la izquierda, el cable antes de realizar dicho desplazamiento y a la derecha el cable una vez realizado el mismo.

5.2.3 INTRODUCCIÓN DE YUGO EN LOS ANCLAJES DE CIERTOS CABLES AL CAMBIO RÁPIDO

En esta parte del proyecto realizaremos simulaciones introduciendo un yugo en el anclaje de las parejas de cables 3-5 y 6-4 al cambio rápido, para intentar regular las tensiones en los cables y ver cómo se comporta el sistema. El yugo tendrá una forma parecida a la que se puede apreciar en la **Figura 3.63**, y estará anclado por uno de sus vértices al cambio rápido,

respecto al cual únicamente puede girar en la dirección del eje y . Los 2 vértices restantes estarán anclados a dos cables (uno por vértice) los cuales podrán girar libremente.



Figura 3.63: Yugo triangular

En la **Figura 3.64** podemos observar cuál será la posición del yugo en el sistema. Colocaremos 2, uno para los cables 3-5 y otro para los cables 4-6.

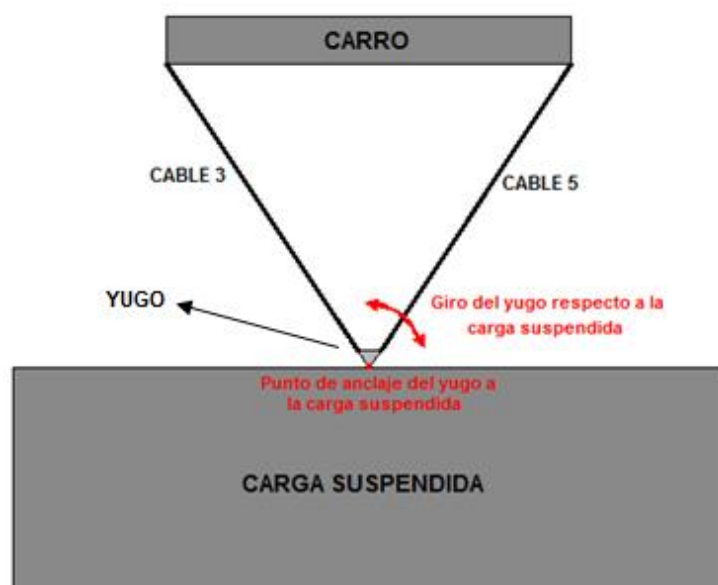


Figura 3.64: Introducción del yugo dentro del modelo

Teniendo en cuenta la experiencia de la compañía con estos componentes, decidimos introducir en el modelo un yugo con forma de triángulo equilátero, con las dimensiones que se muestran en la **Figura 3.65**.

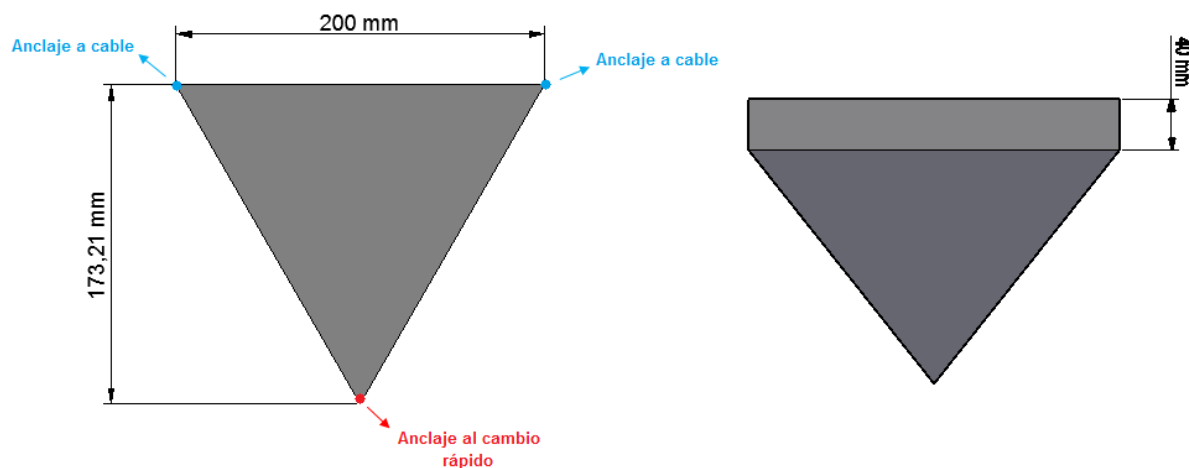


Figura 3.65: Dimensiones del yugo introducido en el modelo 3D

El yugo irá anclado al cambio rápido y a los cables en los vértices de una de sus caras triangulares. Como se puede ver en la Figura 3.65, el anclaje de los cables al yugo hace que el cruzamiento pase a ser de $c = 200 \text{ mm}$, algo que deberemos aplicar al resto de cables del modelo para conservar la disposición en *reeving*.

Para que los cables que no están anclados a ningún yugo, estén a la misma altura que los que sí lo están, tendremos que introducir un suplemento, que estará unido de forma rígida al cambio rápido y al que se unirán a su vez las parejas de cables 1-2 y 7-8. Dichos cables, podrán girar libremente respecto a citado suplemento, que tendrá las dimensiones que se observan en la Figura 3.66.

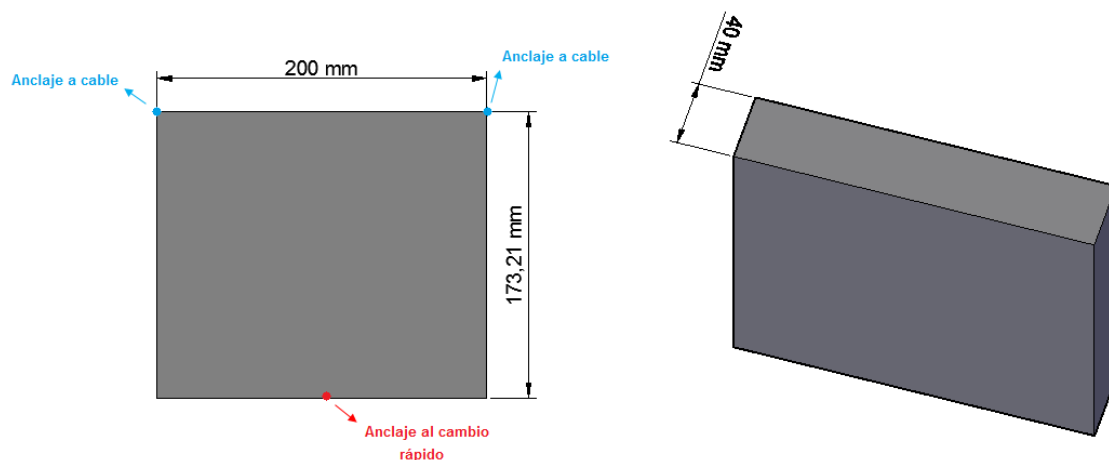


Figura 3.66: Dimensiones del suplemento para el modelo 3D con yugo

Tanto al yugo como al suplemento le impondremos una densidad de 7850 kg/m^3 , típica del acero con el que se suelen construir estos elementos. En la **Figura 3.67** se puede apreciar cómo quedan yugos y suplementos una vez son introducidos en el modelo en *Working Model 3D*.

Hay que aclarar que la altura de suspensión será de nuevo igual a 14 m . Dicha altura será medida en vertical desde el suelo del carro hasta el anclaje de los cables a los yugos y a los suplementos, siempre con los cables sin alargar.

De nuevo los parámetros d_x , d_y y d_A tomarán los valores 0 mm , 105 mm y 1195 mm en este modelo. En la **Figura 3.68** podemos observar con claridad dónde se colocan los anclajes de los cables al cambio rápido, sin olvidar que, en dicho elemento (anclajes señalados con la letra *s*) los cables están unidos a su respectivo yugo o suplemento.

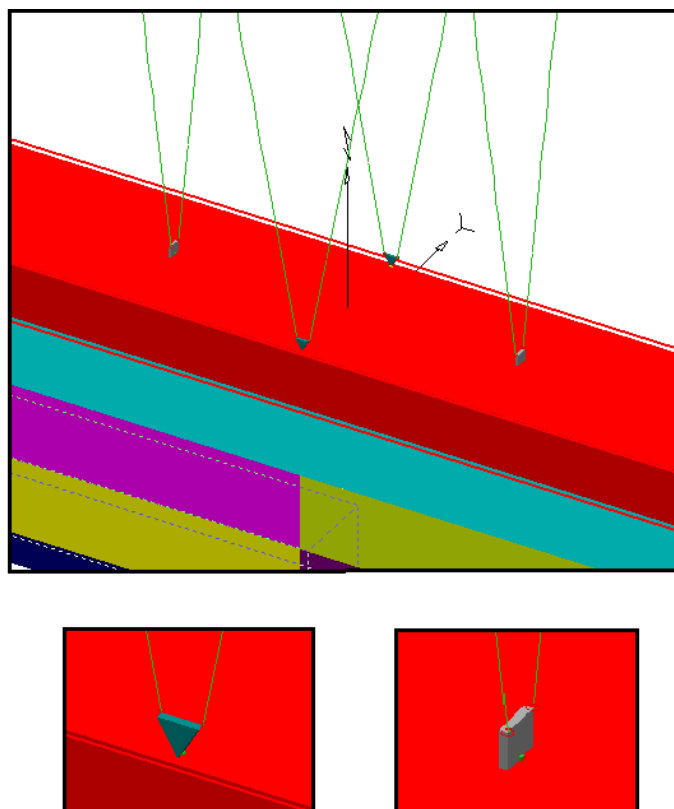


Figura 3.67: Vista general de los yugos y los suplementos dentro del modelo en *Working Model 3D* (arriba), detalle de yugo dentro del modelo en *Working Model 3D* (abajo izquierda) y detalle de suplemento del modelo en *Working Model 3D* (abajo derecha)

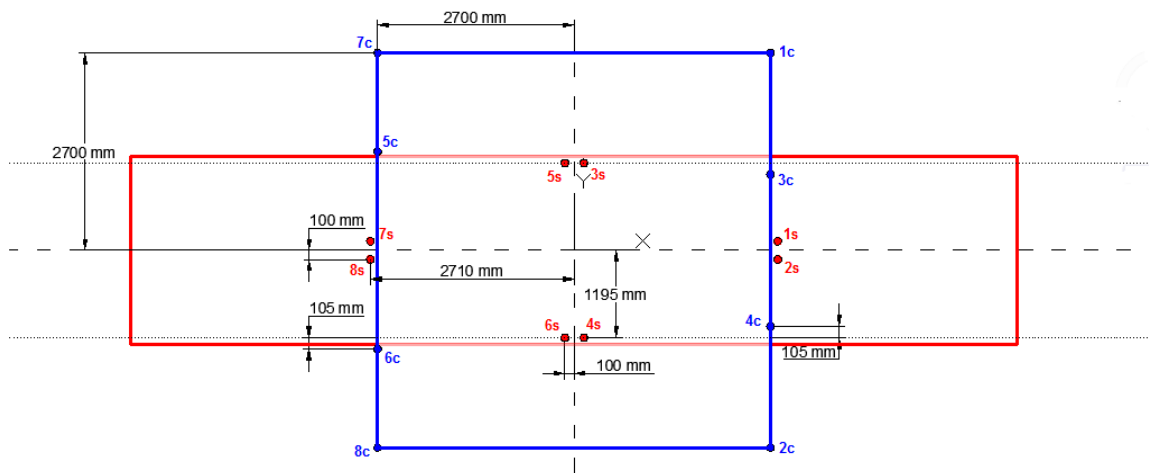


Figura 3.68: Vista en planta del sistema para la visualización de los amarres de los cables para el sistema en 3D con yugo, teniendo en cuenta que en el cambio rápido los cables se unen a su correspondiente yugo o suplemento

6 RESULTADOS A ESTUDIAR Y MÉTODO SEGUIDO PARA OBTENERLOS

6.1 RESULTADOS A OBTENER

Los resultados que más nos interesa sacar son los correspondientes a los desplazamientos y giros de la carga suspendida y las tensiones en los cables. Aparte, en las simulaciones en 2D aprovecharemos para obtener otros resultados como por ejemplo la fuerza que ejerce el actuador sobre el carro para inducir en el mismo la aceleración adecuada.

Las simulaciones se realizarán en un sistema en régimen de aceleración. El sistema partirá del reposo (estado de equilibrio estático), induciendo a continuación en el carro una **aceleración constante igual a $0,2 \text{ m/s}^2$** (aceleración típica en este tipo de grúas) en la dirección del carro para el 2D y en la dirección del carro y del pórtico para el 3D.

Solo induciremos desplazamiento en la grúa en la dirección del carro en el 2D porque es el régimen en el que generalmente trabaja dicho aparato. En las simulaciones en 3D, además induciremos aceleración en la dirección del pórtico por si observáramos situaciones que nos resultaran excesivamente anómalas, como por ejemplo tensiones demasiado elevadas en los cables.

A continuación se muestran los resultados que queremos obtener en cada modelo.

- Modelo 2D

En estas simulaciones queremos comprender el movimiento de la carga suspendida: los armónicos de los que se compone, el orden de magnitud de los desplazamientos, giros y tensiones o cómo afecta la variación del cruzamiento.

Basándonos en la gran cantidad de información que podemos sacar del programa, comenzamos a trabajar con una serie de resultados iniciales, cuyas gráficas temporales aparecen en el Anexo IV y vienen explicadas en la **Tabla 3.5**.

Nombre	Nomenclatura	Definición	Unidades
Desplazamiento relativo de la carga suspendida	$x_{carro}-x_{CM}$	Diferencia entre la posición en x del centro geométrico del carro y la del centro de masa de la carga suspendida	[mm]
Giro de la carga suspendida	θ	Giro producido en la carga suspendida	[°]
Aceleración adimensional de la carga suspendida	a_{CM}^*	Aceleración de la carga suspendida partido de la aceleración inducida al carro	[mm/s ²]
Fuerza adimensional del actuador	$F_{actuador}^*$	Fuerza que ejerce el actuador partido del peso total del sistema (peso del carro más el peso de la carga suspendida)	Sin unidades
Tensión adimensional del cable i	T_i^*	Tensión del cable i partido del peso de la carga suspendida, con $i = 1, 2, 3$ y 4	Sin unidades

Tabla 3.5: Resultados temporales iniciales de las simulaciones 2D

No estudiaremos desplazamientos verticales ya que, como veremos más adelante, son despreciables en relación a los horizontales. Una vez tenemos estos resultados, pasaremos a realizar otra serie de gráficas para cada caso de distribución de la carga, que nos relacionen la información de movimientos y tensiones con los parámetros variables del sistema, al objeto de observar mejor el comportamiento del mismo. Dichas gráficas vienen explicadas en la **Tabla 3.6**. Es necesario señalar que, para poder

separar los armónicos que componen el movimiento deberemos hacer un análisis rápido de Fourier, algo que realizaremos con el programa *Sigview*.

Gráfica	Unidades
Amplitud del armónico i en referencia a la posición relativa en x de la carga suspendida (A_{ix}) en función de c y de h	$A_{ix} [mm]$
Amplitud del armónico i en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{i\theta}$) en función de c y de h	$A_{i\theta} [^\circ]$
Periodo del armónico i (P_i) en función de c y h	$P_i [s]$
Tensión máxima adimensional total del conjunto de cables (T^*_{max}) en función de c y h	$T^*_{max} []$

Tabla 3.6: Gráficas adicionales para un mejor análisis del movimiento en las simulaciones 2D

Aparte, una vez vistos los armónicos que forman el sistema, añadiremos otra gráfica más: una curva que nos muestre el cruzamiento correspondiente a la mínima amplitud del principal armónico del movimiento en referencia a la posición relativa en x , en función a la altura de suspensión h .

- Modelo 3D

En estas simulaciones, sacaremos información del programa exclusivamente sobre los movimientos de la carga suspendida (y del carro para calcular posiciones relativas) y tensiones en los cables.

Para poder comparar mejor los resultados de los distintos casos de distribución de la carga, tomaremos un único punto de medida de los desplazamientos de la carga suspendida. Dicho punto se sitúa en la confluencia de todos los elementos C_i que forman el contenedor, coincidiendo con el centro geométrico del interior del mismo. Para poder ver mejor donde se sitúa el citado punto, podemos ir a la **Figura 3.69**.

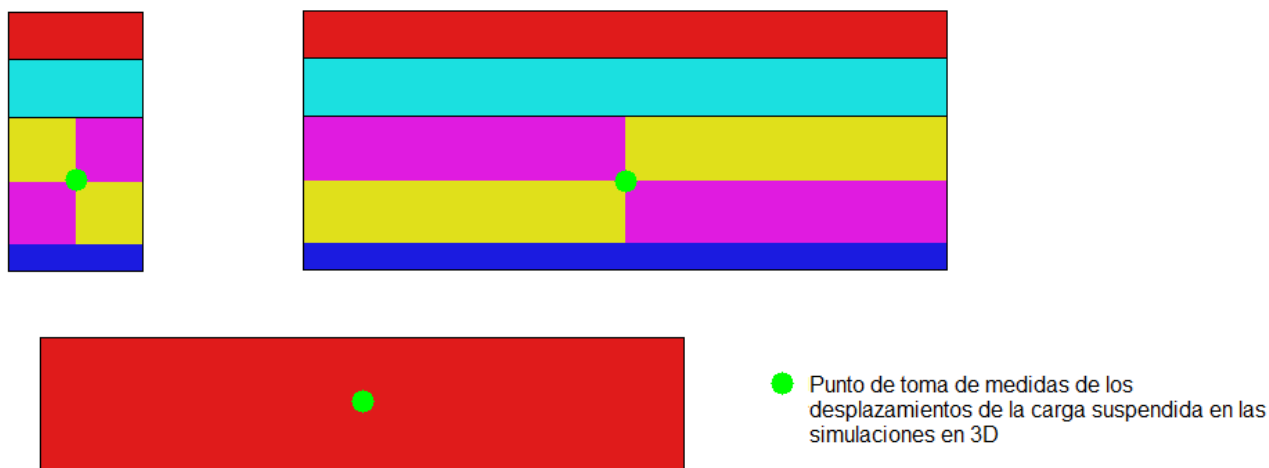


Figura 3.69: Vista de perfil (arriba izquierda), alzado (arriba derecha) y planta (abajo) de la carga suspendida con el punto de toma de medidas de la citada carga en las simulaciones en 3D

Para el conjunto de **simulaciones con parámetros para la variación de los anclajes al carro y al cambio rápido**, con el objetivo de observar de la mejor manera cómo influyen pequeñas variaciones de los citados parámetros en el comportamiento del sistema, realizaremos 2 subconjuntos de simulaciones:

- Simulaciones con d_y y d_A variables y $d_x = 0 \text{ mm}$ constante
- Simulaciones con d_y y d_x variables y $d_A = 1195 \text{ mm}$ constante

En función de los dos subconjuntos de simulaciones vistas antes, distinguiremos también entre dos grupos de gráficas (siendo las gráficas siempre en función del tiempo), gráficas en las que los parámetros variables serán d_y y d_A , y gráficas en las que los parámetros variables serán d_y y d_x . Dichas gráficas se pueden ver en el Anexo VI.

Los resultados que analizaremos, teniendo siempre gráficas temporales, son los que se muestran en la **Tabla 3.7**. Es preciso aclarar que, como en el caso 2D, las tensiones de los cables están adimensionalizadas con el peso de la carga suspendida.

En el conjunto de **simulaciones con inducción de skew en la carga suspendida**, mantendremos constantes los parámetros d_x , d_y y d_A y, en estático, comenzaremos dando valores al parámetro δ para obtener un giro en *skew* de la carga suspendida en torno a 3° , algo que permite una mejor manipulación de los contenedores en puerto, debido a la posibilidad de realizar giros en los mismos.

Una vez conocemos el valor δ que produzca el giro deseado, de nuevo, induciremos aceleración al sistema en la dirección del carro y en la del pórtico con el contenedor girado debido al valor antes citado de δ . El objetivo de esto, es ver cómo se comportaría el sistema si el operario decidiera acelerar la grúa con el contenedor con un cierto *skew*.

Los resultados que analizaremos cuando el sistema está acelerado, serán los mismos que hemos señalado anteriormente, los cuales aparecen en la **Tabla 3.7**.

Resultado	Unidades
Desplazamiento en x (x_{PM}) o desplazamiento relativo ($x_{carro}-x_{PM}$) de la carga suspendida	[mm]
Desplazamiento en y (y_{PM}) o desplazamiento relativo ($y_{carro}-y_{PM}$) de la carga suspendida	[mm]
Giro en x de la carga suspendida (θ_x)	[°]
Giro en y de la carga suspendida (θ_y)	[°]
Giro en z de la carga suspendida (θ_z)	[°]
Tensión adimensional en el cable i (T_i^*), con $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ y 8	[]

Tabla 3.7: Resultados a analizar en el apartado 3D

En la parte de simulaciones en 3D con **introducción de yugo en los anclajes de ciertos cables al cambio rápido**, de nuevo mantendremos constantes los parámetros d_x , d_y y d_z y nos limitaremos a estudiar los resultados de la **Tabla 3.7** para dos valores distintos de δ :

- δ nulo
- δ igual al valor calculado en el punto anterior, necesario para un giro en *skew* de la carga suspendida en torno a 3°

6.2 MÉTODO SEGUIDO PARA OBTENER LOS RESULTADOS

Para obtener las distintas gráficas y valores de las variables que nos interesan, una vez creados los modelos iniciales seguimos los siguientes 5 pasos, válidos para la parte 2D y 3D:

- **Paso 1:** mediante los programas en *Matlab* que se encuentran en los Anexos III y V, calculamos las constantes elásticas de los distintos cables y, en los casos en los que fuera necesario, la longitud de los mismos. A continuación, introduciremos los datos obtenidos en el modelo en *Working Model 2D* o *Working Model 3D*.
- **Paso 2:** calculamos la posición de equilibrio estático de la carga suspendida con una herramienta que poseen los programas *Working Model 2D* y *Working Model 3D* y que se explica en el Capítulo 4. En el caso de simulaciones en 2D con carga centrada, la posición de equilibrio estático nos la calcula el programa en *Matlab* citado en el Paso 1 y que se encuentra en el Anexo III, debiendo ser introducida a continuación en el modelo en *Working Model 2D*.
- **Paso 3:** inducimos aceleración al carro en la dirección deseada y realizamos la simulación.
- **Paso 4:** extraemos los datos de las simulaciones del programa *Working Model 2D* o *Working Model 3D*, los cuales se exportarán en formato *.txt*.
- **Paso 5:** introducimos los datos extraídos en *Excel* y realizamos las transformaciones, gráficas, etc. necesarias para obtener los resultados que nos interesan. En las simulaciones en 2D, también deberemos introducir ciertos datos sacados de *Working Model 2D* en el programa *Sigview*, para conseguir los valores de amplitudes y periodos de la oscilación de la carga suspendida.



CAPÍTULO 4

Creación del modelo en *Working Model 2D* y *Working Model 3D*

1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CON *WORKING MODEL 2D*

En este punto, veremos paso por paso cómo se construyó el modelo en 2D en el programa *Working Model 2D*. Explicaremos cómo se crearon los distintos elementos del sistema (carro, *spreader*, cables, actuadores, etc.), así como las ecuaciones que se introducen en el mismo para un rápido y correcto funcionamiento.

1.1 CREACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

Al abrir el programa nos encontraremos con la pantalla que aparece en la **Figura 4.70**:

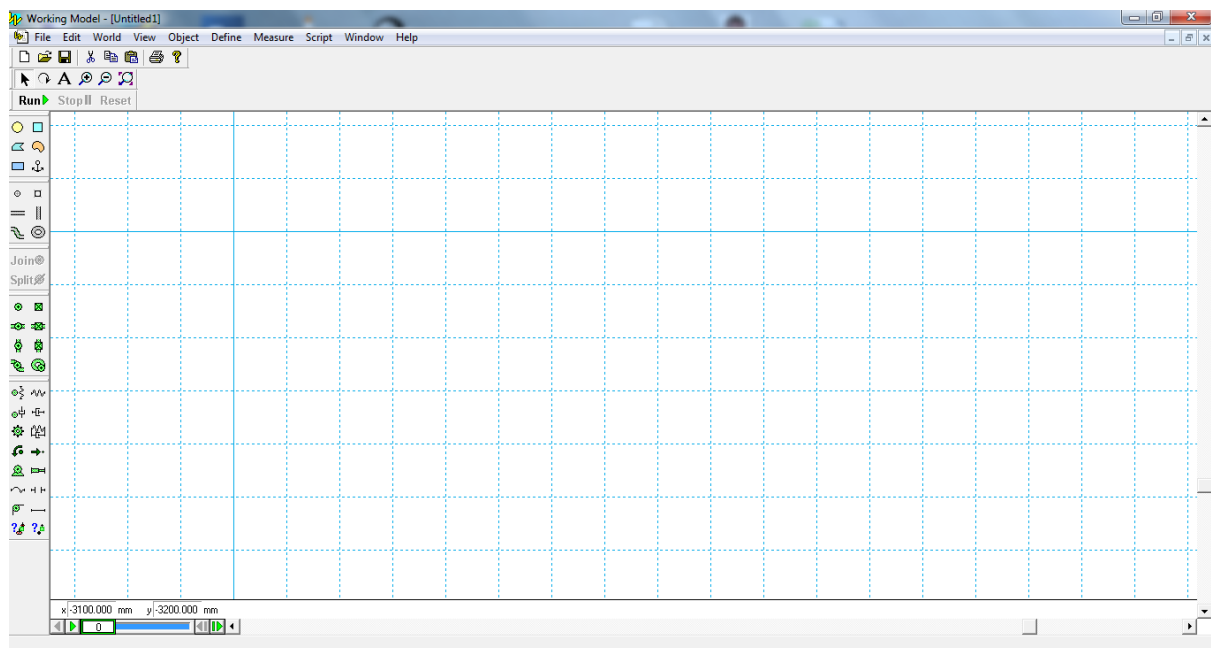


Figura 4.70: Pantalla inicial de *Working Model 2D*

Comenzaremos cambiando las unidades en las que se mostrarán las dimensiones de nuestro modelo. Para ello iremos al menú *View* y seleccionaremos la opción *Numbers and Units* (Figura 4.71).

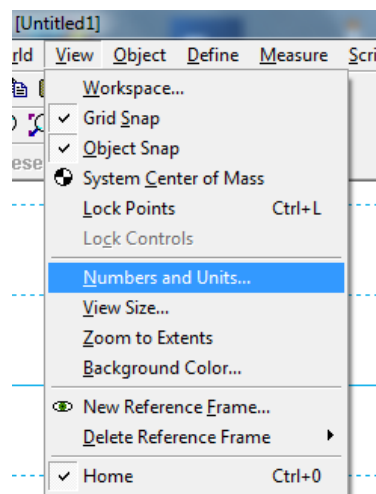


Figura 4.71: Selección de la función *Number and Units*

Nos aparecerá una ventana en la que podremos cambiar las unidades de cierto número de parámetros, así como la forma y número de decimales que se mostrarán en los resultados y a la hora de introducir valores al programa. Nosotros elegiremos el sistema de medidas que aparece en la **Figura 4.72**.

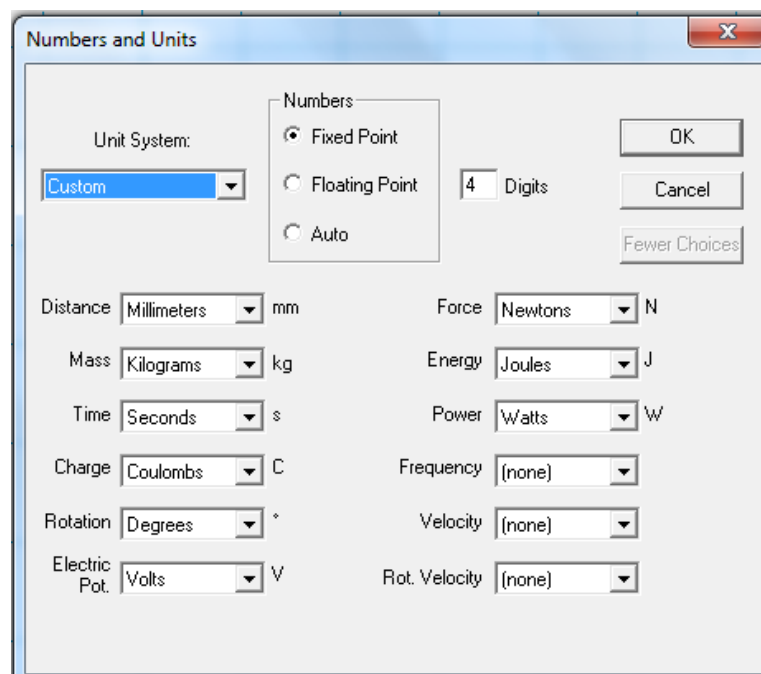


Figura 4.72: Configuración de los valores de la función *Numbers and Units*

Continuaremos creando los distintos rectángulos que conforman carro, *spreader*, cambio rápido y contenedor. A modo de ejemplo crearemos el rectángulo correspondiente al carro (los otros rectángulos se crean de forma análoga). Para ello usaremos la tecla *Rectangle*, situada a la izquierda de la pantalla, que se muestra en la **Figura 4.73**.

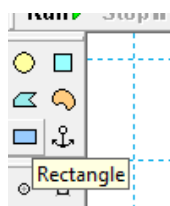


Figura 4.73: Selección de la herramienta *Rectangle*

Una vez creado nuestro rectángulo, pinchamos sobre él para seleccionarlo y abrimos el menú *Window* (**Figura 4.74**).

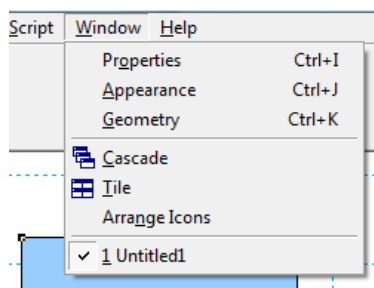


Figura 4.74: Apertura del menú *Window*

Comenzaremos seleccionando la opción *Geometry* dentro de dicho menú y nos aparecerá una ventana en la que podremos modificar las dimensiones de nuestro rectángulo, así como la posición del centro de masa. En nuestro caso, la densidad de cada rectángulo será homogénea, por lo que dentro de la ventana *Geometry* tendremos la opción *Auto* seleccionada, de manera que el programa calcula automáticamente el centro de masa de la figura en coordenadas propias de ésta. Los valores de los distintos parámetros de esta ventana, para nuestro carro, vienen dados en la **Figura 4.75**.

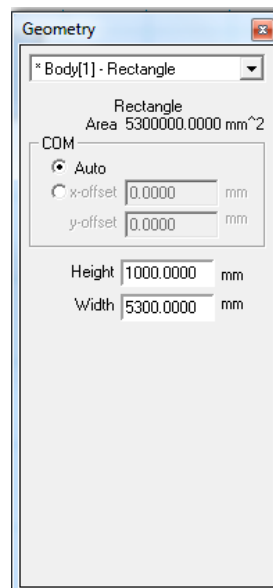


Figura 4.75: Configuración de valores de la función *Geometry* del rectángulo correspondiente al carro

De nuevo, en el menú *Window*, al seleccionar la opción *Properties*, nos aparecerá una ventana que nos permite modificar parámetros como la posición, la masa, coeficiente de fricción, etc. Nosotros, para nuestro carro, tomaremos los valores que se muestran en la **Figura 4.76**.

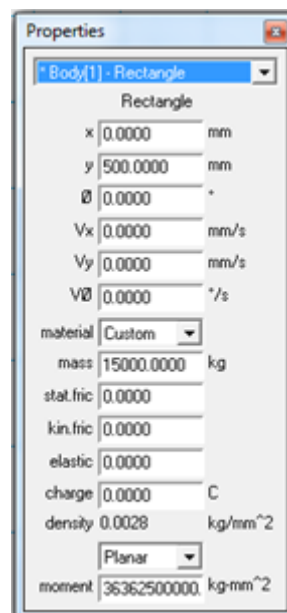


Figura 4.76: Configuración de valores de la función *Properties* del rectángulo correspondiente al carro

Seguidamente, seleccionamos la opción *Appearance*, por si queremos cambiar el color y el nombre de la pieza. Nosotros elegimos las opciones que se muestran en la **Figura 4.77**.

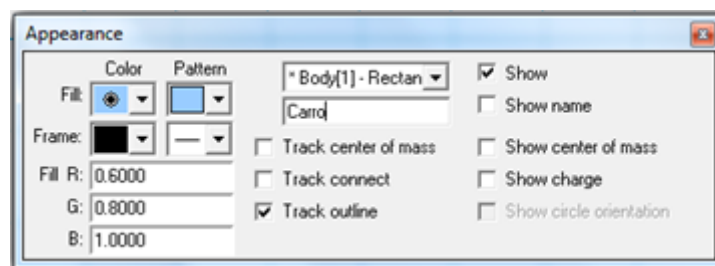


Figura 4.77: Configuración de las distintas opciones de la función *Appearance* correspondiente al rectángulo del carro

Ya hemos creado nuestro carro y lo hemos colocado en la posición que ocupará inicialmente (ver **Figura 4.78**).

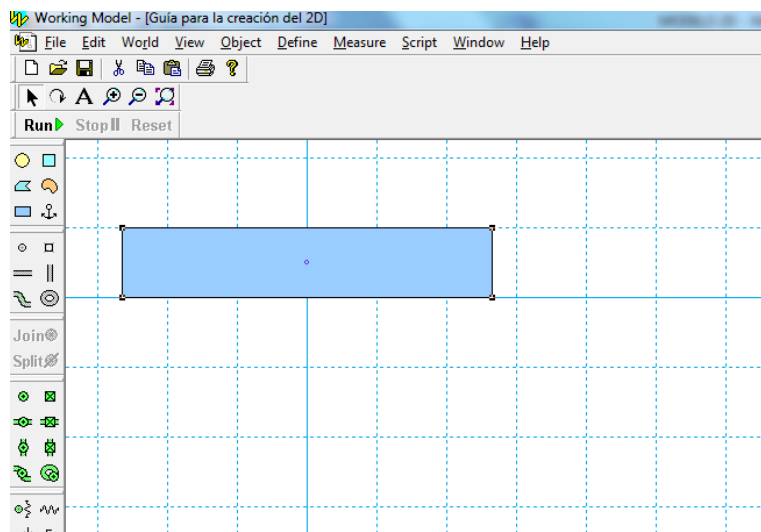


Figura 4.78: Apariencia del rectángulo que modela el carro dentro del entorno *Working Model 2D*

Realizaremos el mismo proceso con el resto de rectángulos pertenecientes a cambio rápido, *spreader* y contenedor. Finalmente, para una $h=5000\text{ mm}$, tenemos el conjunto de elementos con una apariencia igual a la que se muestra en la **Figura 4.79**.

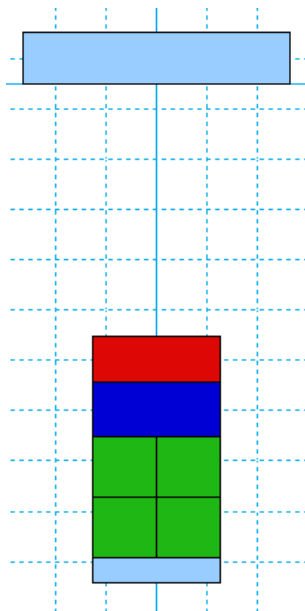


Figura 4.79: Apariencia de los rectángulos que simulan carro, cambio rápido, *spreader* y contenedor en *Working Model 2D*

Una vez creados todos los rectángulos con masa, uniremos de forma rígida el *spreader*, el cambio rápido y el contenedor. Como ejemplo tomaremos la unión entre el cambio rápido y el *spreader*. Para realizar dicha unión rígida seleccionamos la herramienta *Rigid joint* a la izquierda de la pantalla (Figura 4.80).

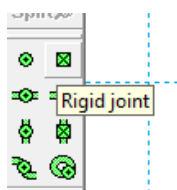


Figura 4.80: Selección de la herramienta *Rigid joint*

A continuación pinchamos sobre el punto en el que queremos unir las 2 piezas y realizamos la unión (ver vista de dicha unión en la Figura 4.81).

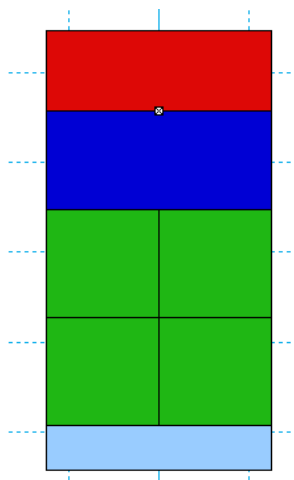


Figura 4.81: Apariencia de la unión rígida entre piezas en *Working Model 2D*

Hacemos lo mismo con el resto de uniones rígidas entre componentes y ya tendremos soldados los distintos elementos que forman nuestra carga suspendida.

El siguiente paso es colocar los resortes que simularán los cables. A modo de ejemplo colocaremos el perteneciente al cable 1. En primer lugar hay que colocar dos *Point element*, uno por cada punto de anclaje del resorte. Para ello seleccionamos la citada herramienta en la parte izquierda de la pantalla (**Figura 4.82**).

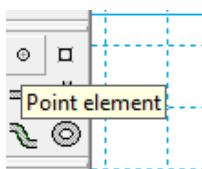


Figura 4.82: Selección de la herramienta *Point element*

Colocaremos uno en el punto de anclaje del cable 1 en el carro y otro en el punto de anclaje de dicho cable en el cambio rápido. Para colocarlo en el lugar exacto, se puede pinchar en un punto cualquiera del elemento en el cual se quiere situar el anclaje y usar la opción *Propiedades* del menú *Window*, de forma parecida a como vimos anteriormente para los distintos rectángulos. Los *Point element* ya colocados, quedan de la forma que se expone en la **Figura 4.83**.

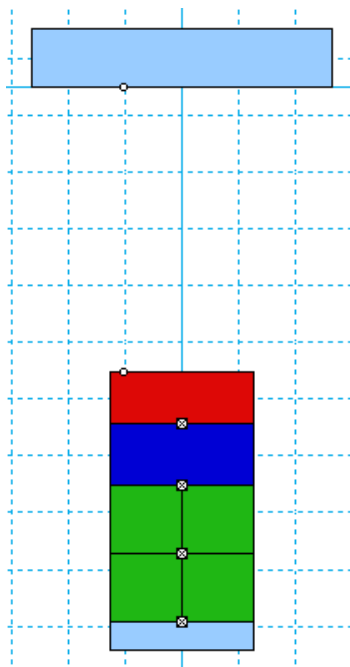


Figura 4.83: Apariencia de los *Point element* creados para los amarres del cable 1 en *Working Model 2D*

Seleccionamos ahora la herramienta *Spring* (**Figura 4.84**)

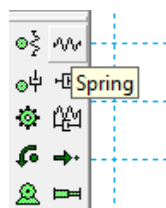


Figura 4.84: Selección de la herramienta *Spring*

A continuación pinchamos en ambos puntos de anclaje del cable 1, que antes señalamos con los *Point element*, quedando creado el cable 1 (**Figura 4.85**).

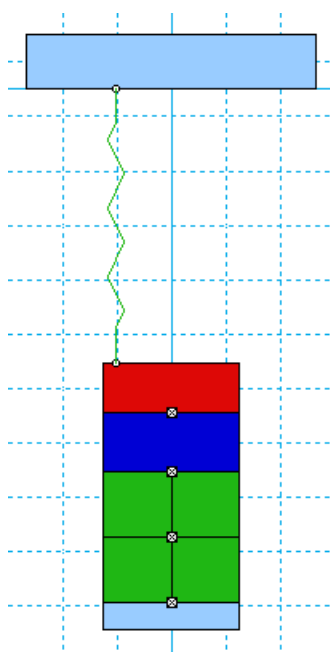


Figura 4.85: Apariencia del resorte creado para el cable 1 en *Working Model 2D*

Cambiamos el nombre del resorte que hemos creado en la opción *Appearance* del menú *Window* a “Cable 1”.

Realizamos el mismo proceso con los 3 cables restantes, quedando el sistema de la forma que se muestra en la **Figura 4.86**.

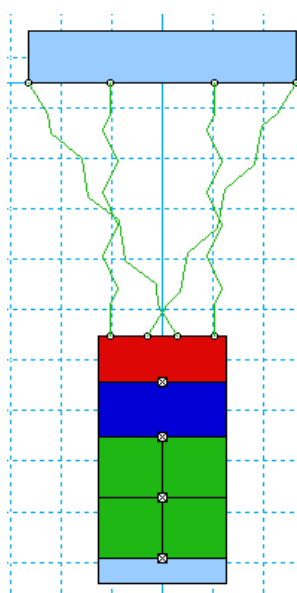


Figura 4.86: Apariencia de los 4 muelles que representan los 4 cables del sistema en *Working Model 2D*

Ahora es el momento de definir la vía en la dirección por la que se moverá el carro, que será obviamente la horizontal. Pinchamos en la herramienta *Keyed Slot joint* (**Figura 4.87**).

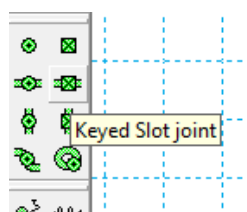


Figura 4.87: Selección de la herramienta *Keyed Slot joint*

Luego pinchamos en el centro geométrico del carro y queda creada la dirección horizontal por la que circulará el carro (**Figura 4.88**).

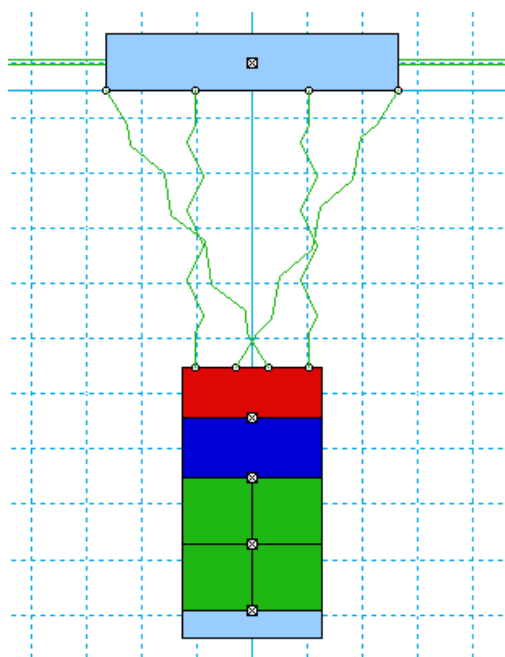


Figura 4.88: Apariencia del *Keyed Slot joint* creado para el modelo en *Working Model 2D*

Por último falta introducir el actuador que acelere el carro en la dirección antes mencionada. Para ello, creamos de nuevo dos *Point element*, uno en el punto del carro, donde el elemento a crear actuará sobre dicho carro, y otro (en línea horizontal con el anterior) fuera del carro como punto de anclaje del actuador. A continuación pinchamos sobre la herramienta *Actuator* (ver **Figura 4.89**).

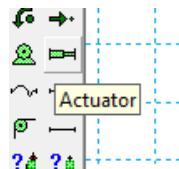


Figura 4.89: Selección de la herramienta *Actuator*

Seguidamente, pinchamos en los *Point element* colocados antes y creamos el actuador (vista en **Figura 4.90**).

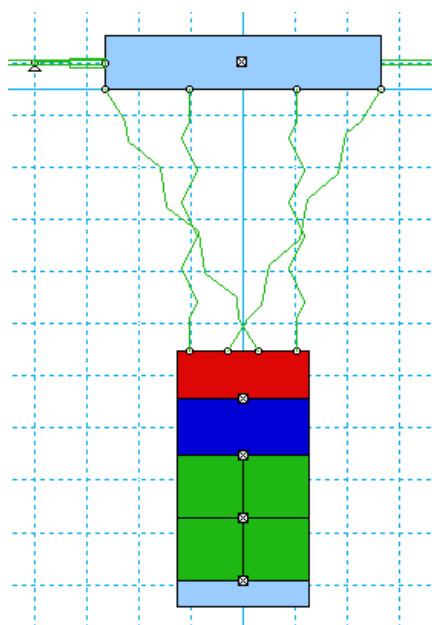


Figura 4.90: Apariencia del modelo en *Working Model 2D* una vez hemos creado todos los elementos y sus uniones

Ya hemos creado todos los elementos que componen nuestro sistema para las simulaciones en 2D. Pasamos a ver ahora como podemos dar valores a las constantes de elasticidad y la longitud de los distintos resortes. Para ello, seleccionamos el resorte en cuestión y pinchamos en la opción *Propierties* del menú *Window*, abriéndose la ventana que aparece en la **Figura 4.91**.

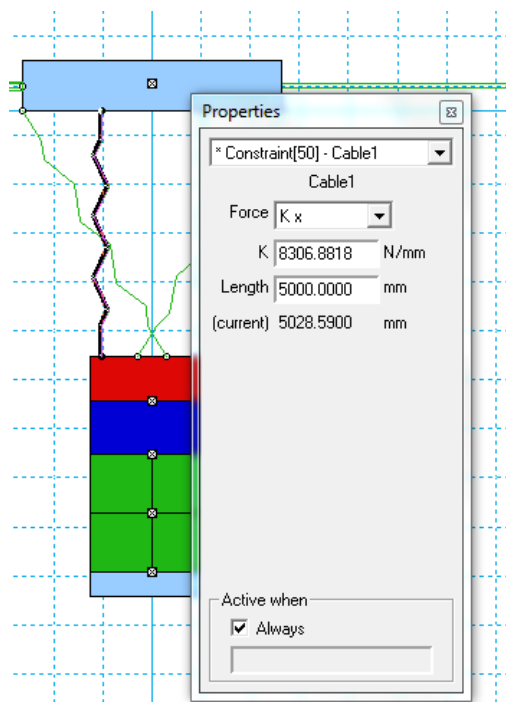


Figura 4.91: Ventana de la función *Propiedades* referente al cable 1 del modelo

En esta ventana, podemos ajustar las longitudes (en este caso *Length*, que marca la longitud natural del resorte) y constantes elásticas de los distintos resortes. Para las simulaciones en 2D, mantendremos siempre marcada la casilla *Always*, lo que significará que el resorte estará siempre activo. Para simular cables, especificamos que estos sólo trabajarían a tracción, por lo que los resortes sólo deberían estar activos mientras que estuvieran traccionados. Sin embargo, como veremos en las simulaciones, en el sistema en 2D nunca se dará el caso en el que haya resortes que trabajen a compresión, por lo que, como hemos dicho antes, mantendremos siempre marcada la citada casilla.

Para introducir el valor de la longitud del resorte (*Length*), tenemos que considerar que, inicialmente, los resortes tienen alargamiento nulo cuando la carga se encuentra a la altura de suspensión h y la figura es simétrica respecto del eje y que definimos para las simulación en *Working Model 2D*. Para esta posición de la carga, calcularemos la longitud de los muelles por simples cálculos geométricos.

Teniendo calculada la longitud inicial de los resortes para una determinada h , podemos calcular las constantes elásticas k de dichos resortes mediante la expresión que ya hemos visto en anteriores ocasiones:

$$k = \frac{E_a \cdot S_{cable}}{L_0}$$

Una vez tenemos las longitudes y constantes elásticas de los resortes, vemos de qué manera nos resulta más rápido meterlas en el modelo. Nosotros hemos elegido la opción de crear una serie de *Generic Control*, que son unas herramientas que se sitúan en el espacio de trabajo y a las que se puede dar valores, vinculando dichos valores a parámetros de posición, constantes de los actuadores, etc. Nosotros crearemos un *Generic Control* para la altura h , otro para la longitud c y otro para las constantes de los resortes k .

A modo de ejemplo, crearemos el *Generic Control* para la longitud c . Para crear un *Generic Control* pinchamos en el menú *Define* → *New Control* → *Generic Control* (Figura 4.92).

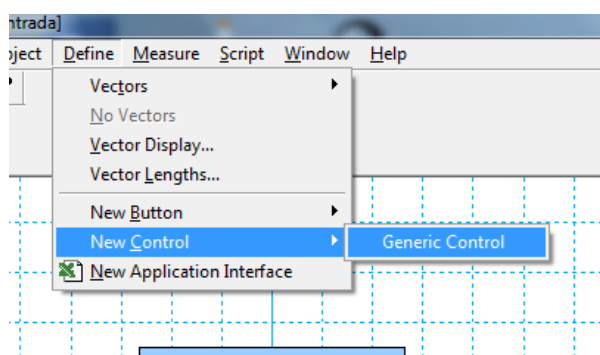


Figura 4.92: Selección de la herramienta *Generic Control*

Nos aparece entonces la herramienta que se observa en la Figura 4.93 en nuestro espacio de trabajo.

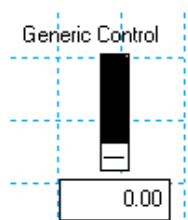


Figura 4.93: Apariencia inicial de un *Generic Control*

A continuación, pinchamos sobre ella, vamos al menú *Window* → *Appearance* y le ponemos el nombre que creamos conveniente, en este caso c (mm) (Figura 4.94)

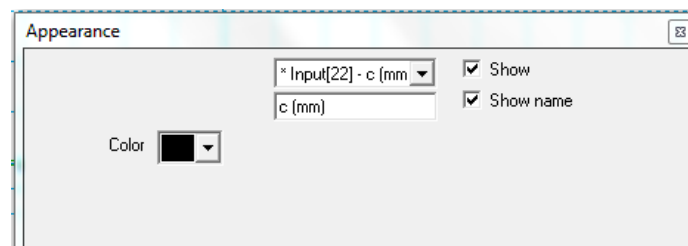


Figura 4.94: Configuración de las distintas opciones de la función *Appearance* del *Generic Control* en el cual marcaremos los valores que queremos que tome el cruzamiento *c*

Vemos que el programa ha llamado *Input[22]* al *Generic Control* que hemos creado. Este comando es muy importante, porque será la forma en la que tendremos que introducir la variable *c* en las fórmulas geométricas necesarias para el cálculo de la longitud de los cables.

A continuación vamos a *Window* → *Propiedades* y cambiamos el aspecto a *Text box*, e imponemos un intervalo en el que se puede mover el valor del *Generic Control* (Figura 4.95).

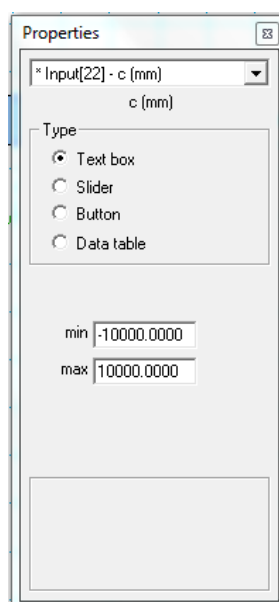


Figura 4.95: Configuración de las distintas opciones del *Generic Control* referente al cruzamiento *c*

El aspecto que tiene ahora dicho control es el que aparece en la Figura 4.96.

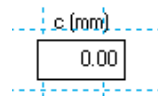


Figura 4.96: Apariencia final del *Generic Control* referente al cruzamiento c

A partir de ahora podemos pinchar sobre el control e introducir el valor que consideremos oportuno dentro del intervalo que hemos definido.

De la misma forma, creamos otro *Generic Control* para la altura h y otro para la constante de elasticidad k (Figura 4.97).

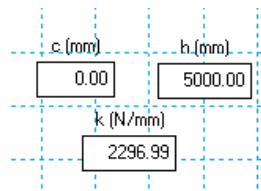


Figura 4.97: Apariencia final de los 3 *Generic Control* creados para los distintos parámetros a introducir en el modelo

El programa ha llamado de la siguiente forma a estos controles:

1. $c \text{ (mm)} \rightarrow \text{Input}[22]$
2. $h \text{ (mm)} \rightarrow \text{Input}[23]$
3. $k \text{ (N/mm)} \rightarrow \text{Input}[15]$

Ahora, es el momento de definir, mediante fórmulas geométricas en función de c y h , la longitud de los cables. Introduciremos esta fórmula en la opción *Length* de las propiedades de los cables 1 y 2:

$$\text{Input}[23]$$

Para los cables 3 y 4, usando geometría para calcular la longitud inicial, introduciremos la siguiente fórmula en la opción *Length*:

$$\left(\left(2650 - \frac{\text{Input}[22]}{2} \right)^2 + (\text{Input}[23])^2 \right)^{0.5}$$

Para todos los cables, introduciremos la siguiente expresión en la opción *K* de las propiedades de todos los resortes:

$$\text{Input}[15]$$

Mostramos a continuación, en la **Figura 4.98**, cómo se han introducido dichas fórmulas en la ventana de *Propiedades* de los cables 1 y 2:

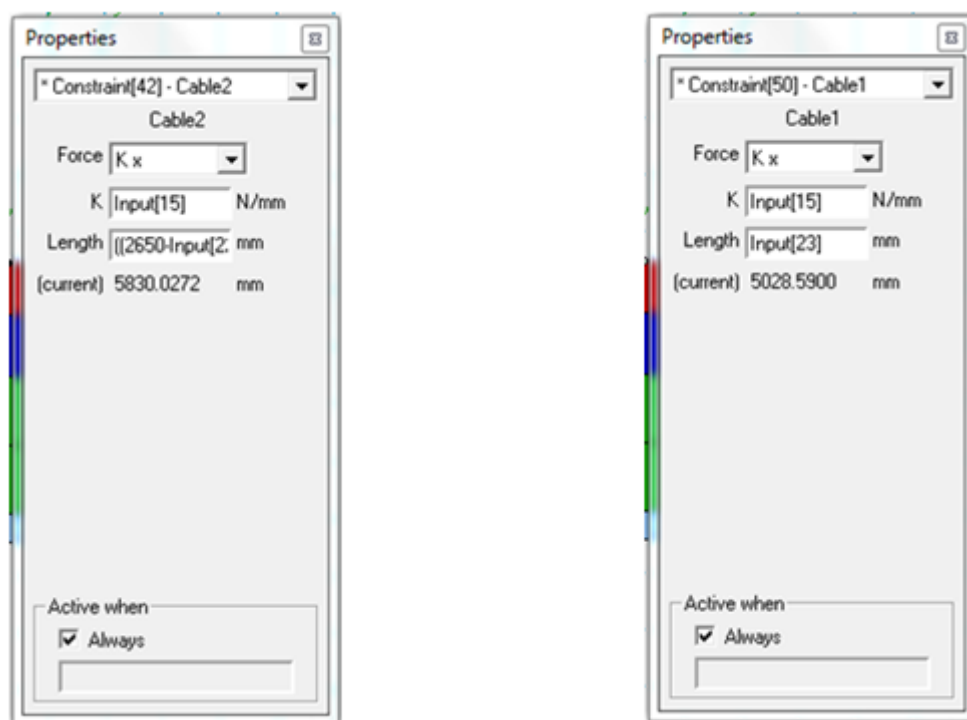


Figura 4.98: Ventana *Propiedades* de los muelles que simulan los cables 1 y 2 una vez introducidas las fórmulas para el cálculo de los parámetros de dichos muelles

1.2 AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE PRECISIÓN DE LA SIMULACIÓN Y DEL TIEMPO EN EL QUE DICHA SIMULACIÓN SE DEBE DETENER

Para ajustar la precisión con la que queremos realizar la simulación abriremos el menú *World* → *Accuracy* (**Figura 4.99**).

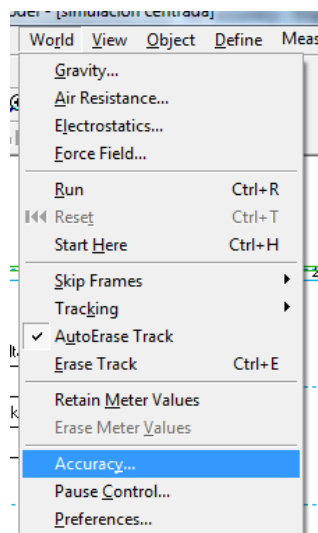


Figura 4.99: Selección de la función *Accuracy*

Se nos abrirá una ventana en la que podremos ajustar distintos parámetros de precisión. Nosotros usaremos los valores que aparecen en la **Figura 4.100**.

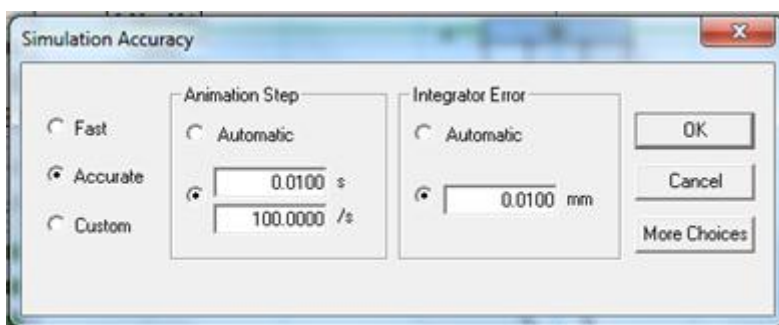


Figura 4.100: Valores de distintos parámetros de la función *Accuracy* del modelo

Para ajustar el tiempo en el que queremos que la simulación se detenga, nos iremos al menú *World* → *Pause Control* (**Figura 4.101**).

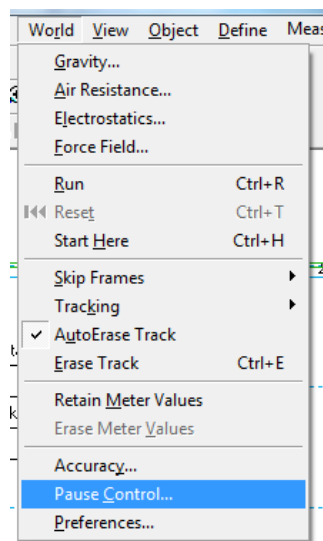


Figura 4.101: Selección de la función *Pause Control*

Nos saldrá una nueva ventana, en la que podremos programar distintas paradas en la simulación. Nosotros en un principio elegiremos las opciones que se pueden ver en la **Figura 4.102**.

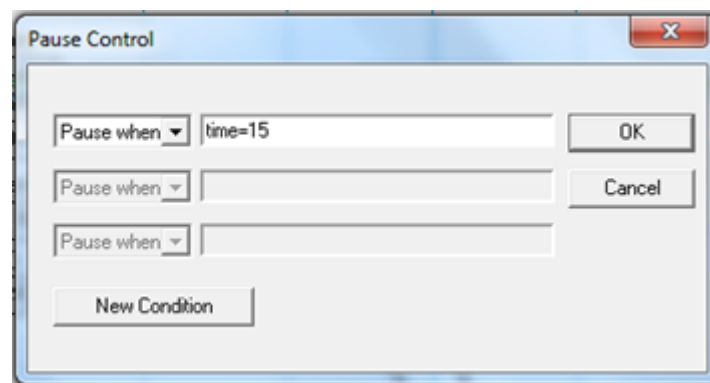


Figura 4.102: Configuración del tiempo de parada de la simulación

1.3 POSICIÓN INICIAL

Si ponemos a correr la simulación con los resortes en la posición en la que los muelles tienen alargamiento nulo, la carga suspendida no estará en equilibrio estático inicialmente, y se inducirán una serie de vibraciones de la carga que interferirán de forma negativa en el resultado final de las simulaciones.

Es por tanto necesario encontrar una posición inicial en la que la carga suspendida se encuentre en equilibrio estático, antes de poner a correr la simulación. Esta posición inicial, la calcularemos de forma distinta dependiendo de si el conjunto del contenedor tiene su centro de masa en $x_{cont}=0$ (carga centrada en x) o en $x_{cont}\neq 0$ (carga descentrada en x), tomando como referencia los ejes del contenedor de la manera que se expone en la **Figura 4.103**.

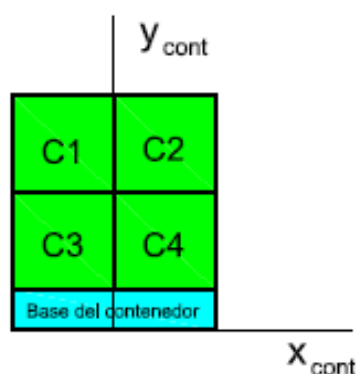


Figura 4.103: Sistema de coordenadas en ejes del contenedor

1.3.1 CARGA CENTRADA EN x

Supongamos que tenemos nuestro sistema a simular en *Working Model 2D*, inicialmente en una posición en la que los resortes (todos con la misma constante elástica k) tienen alargamiento nulo. A continuación, realizamos un desplazamiento δ_y vertical hacia abajo, de forma que la carga se encuentre en posición de equilibrio estático. Si representamos lo dicho anteriormente, con las fuerzas que ejercen los muelles y el peso de la carga suspendida (que consideraremos con masa m) obtenemos el sistema que se muestra en la **Figura 4.104**.

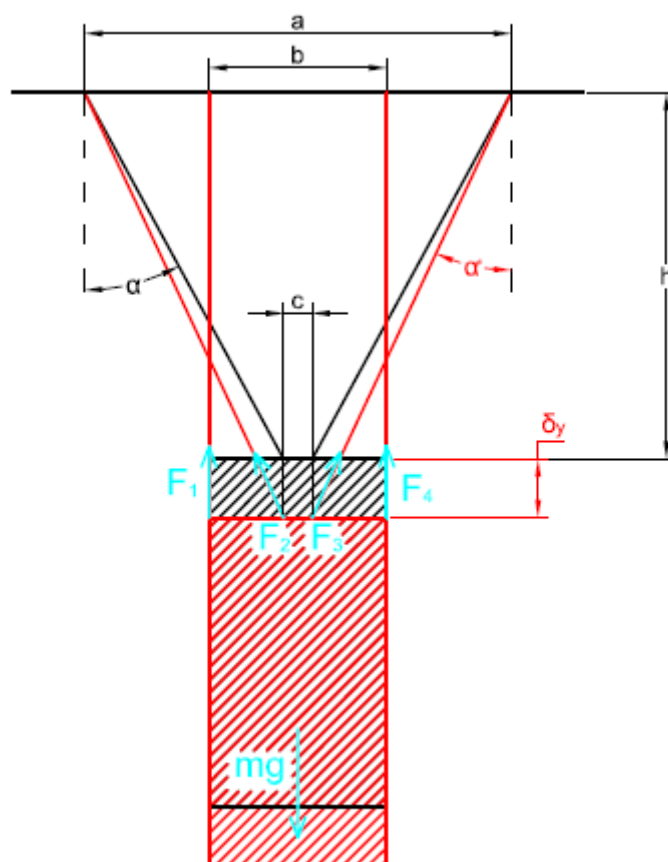


Figura 4.104: Esquema para el cálculo del desplazamiento vertical δ_y necesario para la obtención de la posición inicial de equilibrio estático cuando tenemos carga centrada en x

En equilibrio estático, el sumatorio de las fuerzas verticales es nulo, entonces:

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_1 + F_2 \cos \alpha' + F_3 \cos \alpha' + F_4 = mg$$

$$2k\delta_y + 2k \left(\frac{h + \delta_y}{\cos \alpha'} - \frac{h}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha' = mg$$

Si despejamos δ_y de la ecuación anterior obtenemos:

$$\delta_y = \frac{mg}{4k} + \frac{h}{2} \left(\frac{\cos \alpha'}{\cos \alpha} - 1 \right)$$

Sabiendo que $\cos \alpha'$ viene de la siguiente expresión:

$$\cos\alpha' = \frac{h + \delta_y}{\sqrt{(h + \delta_y)^2 + \left(\frac{a}{2} - \frac{c}{2}\right)^2}}$$

Utilizando el método iterativo del punto fijo con las 2 expresiones anteriores (para δ_y y $\cos\alpha'$), podemos calcular el valor de δ_y que nos proporcione una posición de equilibrio estático. Para ello usaremos el programa de *Matlab* que se encuentra en el Anexo III.

Una vez calculada la posición inicial estática, ajustaremos la posición de nuestro modelo en *Working Model 2D*. Para ello usaremos un nuevo *Generic Control*, que tendrá el aspecto que se muestra en la **Figura 4.105**.

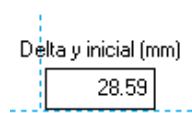


Figura 4.105: Apariencia del *Generic Control* para la introducción del desplazamiento δ_y inicial

Con este *Generic Control*, ajustaremos las distintas posiciones iniciales de los elementos que conforman la carga suspendida, y ya tendremos nuestro modelo en posición de equilibrio estático, listo para empezar la simulación.

Es necesario comprobar en *Working Model 2D* si al introducir el valor calculado con *Matlab* para δ_y , el sistema se mantiene en equilibrio estático (sin introducir ninguna aceleración en el carro) y pudimos observar que efectivamente el sistema se mantiene en equilibrio.

1.3.2 CARGA DESCENTRADA EN X

Si tenemos una carga descentrada en x, al intentar calcular por equilibrio de fuerzas la posición de equilibrio estático, obtenemos un sistema con ecuaciones muy complejas.

Es preferible en este caso utilizar una función que nos proporciona *Working Model 2D*, la cual se denomina *Start Here*. Al poner a correr la simulación, el programa nos permite volver hacia atrás en la simulación, parar en un punto determinado, etc. Una vez que nos posicionamos en el instante de tiempo que deseamos, con la herramienta *Start Here* podemos cambiar los parámetros de velocidad y posición de los elementos de la simulación en dicho instante, y hacer que la simulación comience de nuevo a partir de ese instante de tiempo, manteniendo los valores de los parámetros que no hallamos tocado y usando los valores nuevos de los parámetros que hayamos cambiado.

Nosotros seguiremos los siguientes pasos para encontrar nuestra posición de equilibrio estático con *Start Here*:

1. Comenzamos asegurándonos de que el actuador que introducimos en nuestro modelo trabaja a modo de freno en el carro, es decir, induce una velocidad nula en dicho carro. Para ello, vamos a la opción de *Propierties* para dicho actuador y elegimos la configuración que se observa en la **Figura 4.106**.

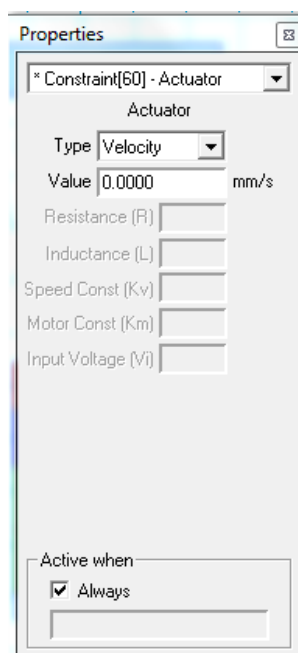


Figura 4.106: Valores iniciales de la función *Propierties* del carro que nos aseguran que éste se encuentra inmóvil para el cálculo de la posición inicial de equilibrio estático

2. Seleccionamos cualquier elemento de la carga suspendida (nosotros hemos elegido el cambio rápido por ejemplo) y en el menú el *Mesure* → *Velocity*, elegimos las opciones *X Graph*, *Y Graph* y *Rotation Graph* que podemos ver en la **Figura 4.107**.

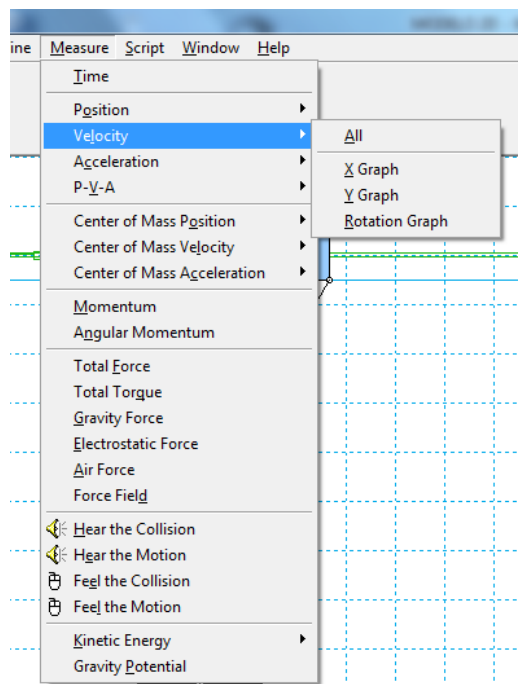


Figura 4.107: Selección de las distintas opciones del submenú *Velocity* que nos son de interés

Las opciones elegidas, nos permitirán observar las gráficas de velocidad en la dirección x e y del elemento seleccionado, así como su velocidad angular, a medida que se va desarrollando la simulación (Figura 4.108).

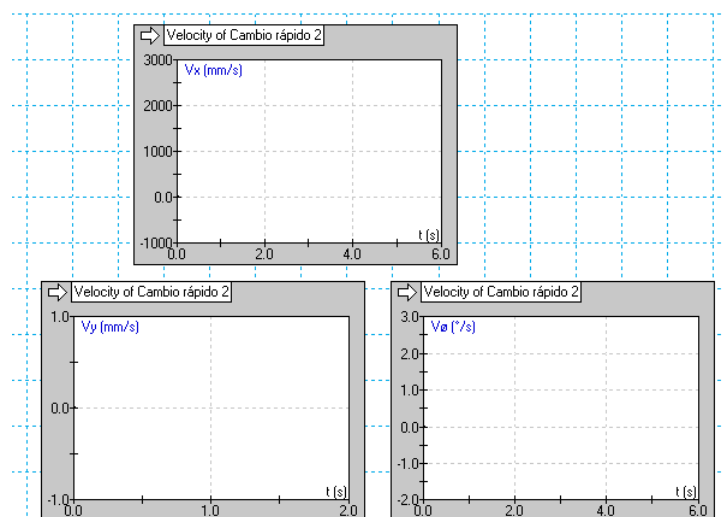


Figura 4.108: Ventanas en las que seguiremos la evolución temporal de los valores de las distintas velocidades en *Working Model 2D*

3. Ponemos a correr la simulación unos cuantos segundos, con los valores adecuados de longitud y constante elástica de los resortes. Obtendremos unas gráficas tipo senoides, como las que se muestran en la **Figura 4.109**.

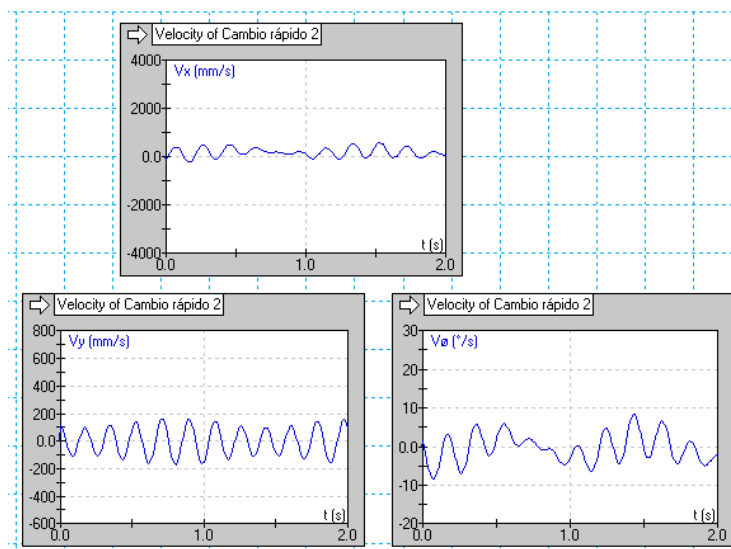


Figura 4.109: Gráficas temporales de velocidades obtenidas al poner a correr la simulación por primera vez

4. En la parte inferior de la pantalla de trabajo de *Working Model 2D*, tenemos una herramienta que nos permite parar la simulación, ir hacia delante o hacia atrás (**Figura 4.110**).



Figura 4.110: Herramienta de *Working Model 2D* que nos permite movernos hacia delante o detrás en el tiempo de la simulación

Usamos dicha herramienta y, utilizando por ejemplo la gráfica de velocidad en y , nos desplazamos hasta un instante en el que consideremos que hay un máximo o un mínimo relativo en la senoide que forma la gráfica, lo que indicará que, de alguna manera, la velocidad es máxima dentro de un armónico de los que forma la función de velocidad elegida. Esto nos dice que la carga suspendida está oscilando, en ese armónico, alrededor de la posición en la que se encuentra el elemento seleccionado en ese instante, que es la posición de equilibrio para dicho armónico (**Figura 4.111**).

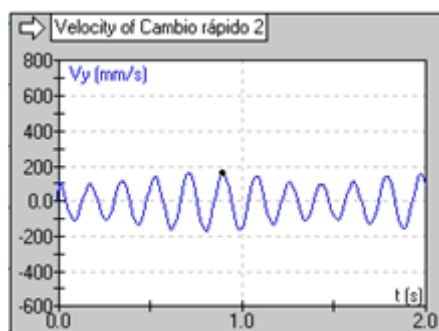


Figura 4.111: Instante de tiempo en el que tenemos un máximo en una de las gráficas de velocidad

5. Para este instante de tiempo elegido, vamos al menú *World* → *Start Here* (Figura 4.112).

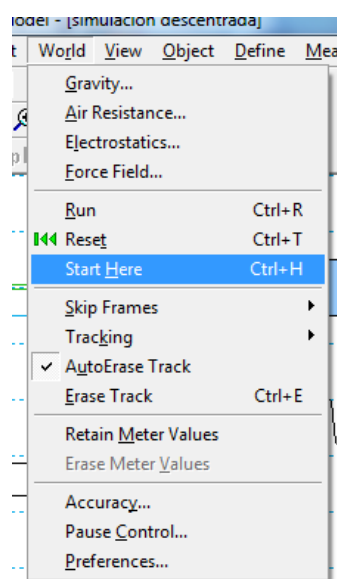


Figura 4.112: Selección de la herramienta *Start Here*

6. Ahora, vamos a las ventanas de *Propierties* de todos los elementos que forman la carga suspendida e introducimos cero en todos los valores de velocidad (tanto en *x* como en la velocidad angular). Por ejemplo, para el *spreader* tendríamos la ventana que se observa en la Figura 4.113.

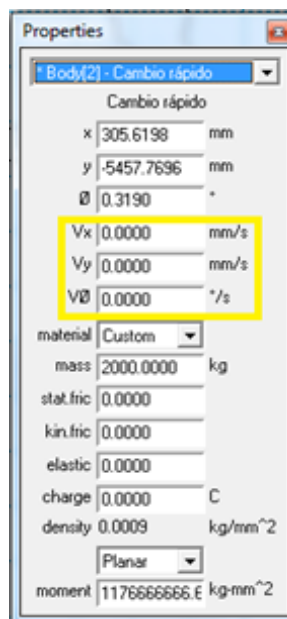


Figura 4.113: Valores nulos de velocidad del elemento que simula el *spreader* para el proceso de cálculo de la posición inicial de equilibrio estático

7. A continuación, volvemos a poner a correr la simulación y veremos como la función de velocidad en y ha mejorado, en el sentido de que los valores absolutos de los máximos y mínimos de dicha función serán mucho más bajos (Figura 4.114)

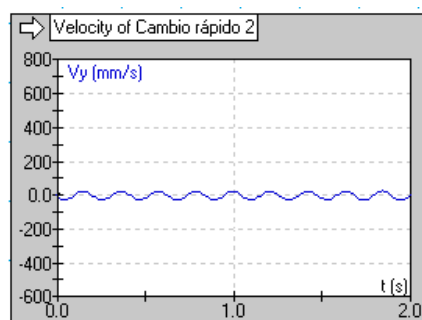


Figura 4.114: Mejoría de la gráfica temporal de velocidad a la que se ha aplicado los pasos anteriores para el cálculo de la posición inicial de equilibrio estático

8. Llevamos a cabo este mismo proceso en los tres parámetros de velocidad, hasta que lleguemos a una situación en la que las funciones de velocidad sean prácticamente una línea horizontal de valor cero, con un error (que siempre tendremos) que nos parezca aceptable. Una vez llegados aquí, habremos encontrado nuestra posición de equilibrio

estático y podremos comenzar con nuestra simulación, induciendo mediante el actuador una aceleración en el carro.

Este método es más lento que el utilizado para carga centrada, pero como hemos dicho anteriormente, es preferible usarlo cuando tenemos carga descentrada, debido a la complejidad del sistema de ecuaciones que obtenemos para el cálculo del equilibrio estático.

1.4 OBTENCIÓN DE LOS DATOS

En este punto, vamos a explicar cómo exportamos los datos que nos interesan de las simulaciones fuera del programa *Working Model 2D*.

Seleccionamos el elemento de la simulación sobre el que queremos sacar alguna información y, a continuación, nos vamos al menú *Measure*. Nosotros, por ejemplo, hemos seleccionado el carro y en el menú *Measure* se nos presentan opciones que aparecen en la **Figura 4.115**.

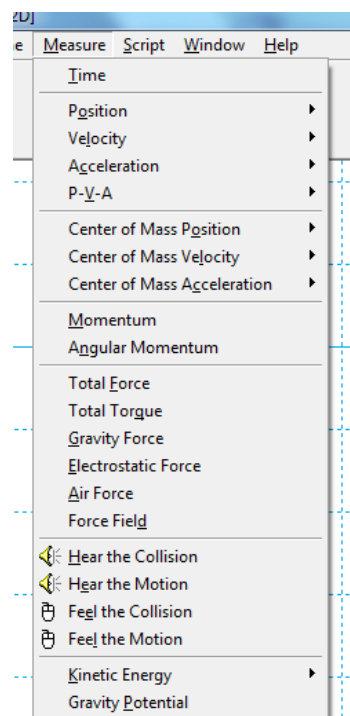


Figura 4.115: Opciones dentro del menú *Measure*

Seleccionamos los datos que queremos obtener de los elementos de la simulación que nos interesan, y nos saldrán distintas ventanas, en las que se nos mostrará dicha información a lo largo del tiempo de la simulación.

A continuación, pinchamos en el menú *File* → *Export* (**Figura 4.116**), para exportar en un cierto formato (en nuestro caso elegiremos *.txt*) la información que nos parezca oportuna, dentro de las opciones que habíamos elegido anteriormente. Elegimos también el tiempo de simulación a exportar.

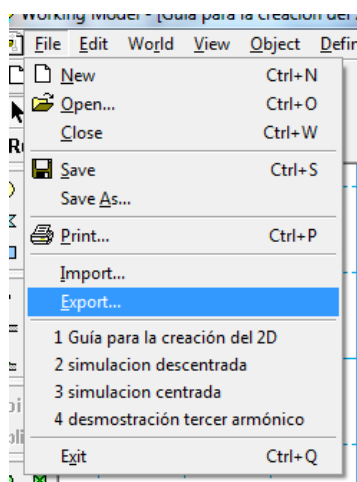


Figura 4.116: Selección de la función *Export*

Una vez hemos tenemos el archivo *.txt*, lo introducimos en *Microsoft Excel* para construir las gráficas oportunas y sacar la información que nos parezca más importante.

2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CON *WORKING MODEL 3D*

Del mismo modo que hemos hecho con el modelo 2D, en este apartado explicaremos, paso a paso, cómo se ha creado el modelo en *Working Model 3D*.

Working Model 3D es bastante parecido a la hora de construir modelos y sacar resultados que la versión 2D, por lo que bastantes pasos a la hora de crear nuestro modelo, serán iguales a los expuestos para el 2D.

2.1 CREACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

Al arrancar el programa nos encontraremos la pantalla que aparece en la **Figura 4.117**.

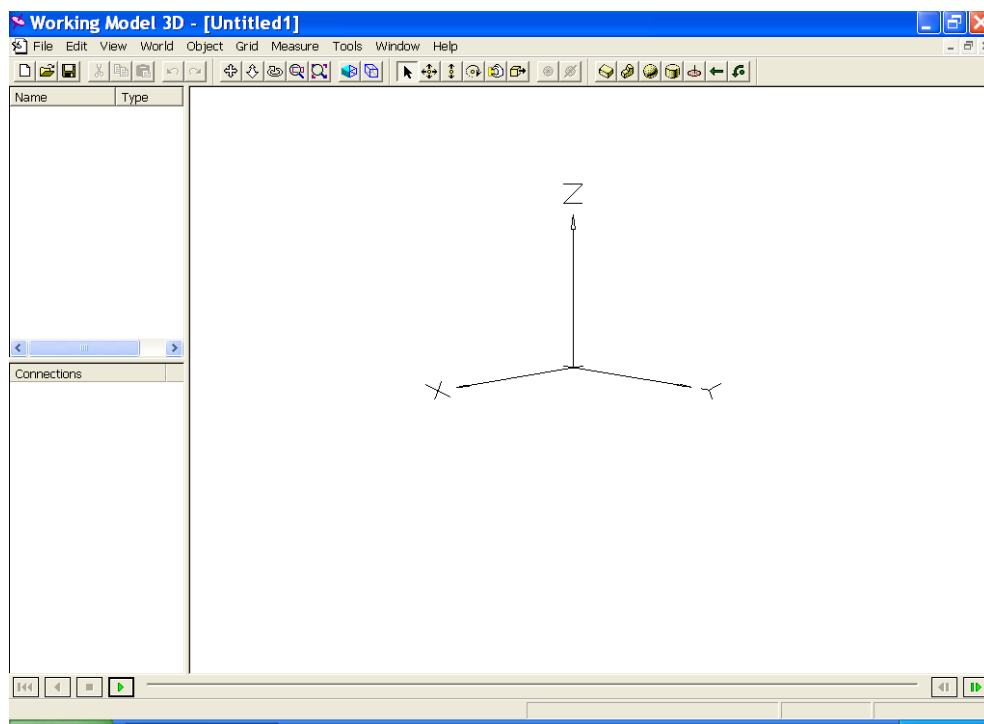


Figura 4.117: Pantalla inicial de *Working Model 3D*

Inicialmente vamos a definir las unidades con las que vamos a trabajar. Para ello, vamos al menú *World* y seleccionamos la opción *Numbers & Units* (**Figura 4.118**).

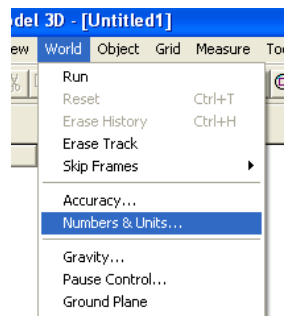


Figura 4.118: Selección de la función *Numbers & Units*

En la ventana que nos aparece introducimos las unidades que se ven en la **Figura 4.119**.

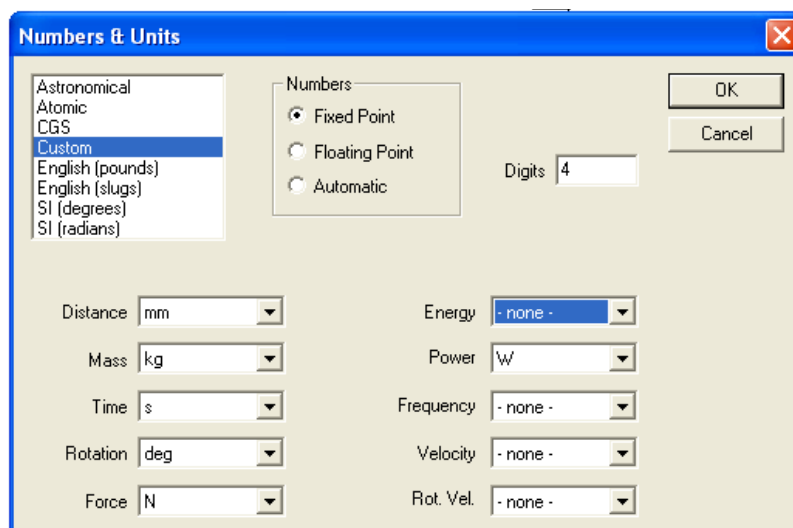


Figura 4.119: Opciones elegidas en la función *Number & Units*

Vamos a crear ahora los distintos prismas rectangulares que componen el modelo. Pondremos como ejemplo la creación del prisma que representa el carro. Primeramente pinchamos en la tecla *Box* (**Figura 4.120**).



Figura 4.120: Selección de la herramienta *Box*

A continuación, creamos un prisma rectangular como el que se muestra en la **Figura 4.121**.

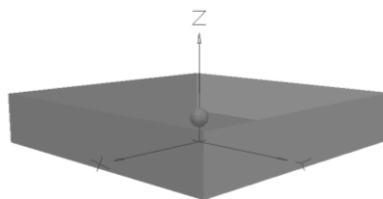


Figura 4.121: Prisma rectangular creado con la herramienta *Box*

El siguiente paso, es especificar las dimensiones, posición, masa, etc. de la pieza, así como su nombre y aspecto. Para ello, hacemos doble *click* sobre la citada pieza e introducimos dichos parámetros en las pestañas adecuadas. A modo de ejemplo, en la **Figura 4.122**, se muestran las dimensiones introducidas en la pestaña *Geometry*:

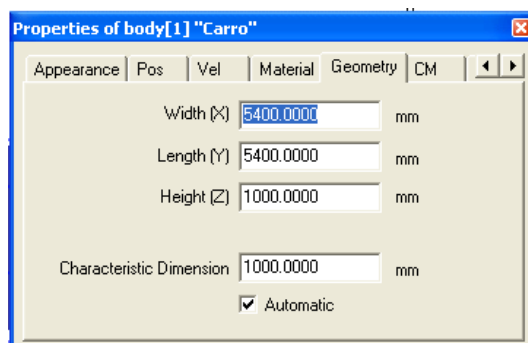


Figura 4.122: Introducción de las dimensiones del elemento seleccionado

De manera análoga creamos el resto de prismas, obteniendo el resultado que se observa en la **Figura 4.123**.

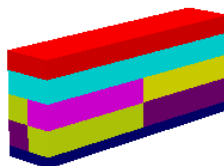


Figura 4.123: Aspecto de los elementos creados para modelar carro, cambio rápido, *spreader* y contenedor

Es el momento de crear los distintos resortes que simularán los cables. Para esta tarea, nos ayudaremos de la herramienta *Coord*, con la que podemos introducir una serie de puntos que nos sirvan de referencia en la pieza para situar los puntos de amarre de los cables al *spreader* y al cambio rápido (**Figura 4.124**).



Figura 4.124: Selección de la herramienta *Coord*

A modo de ejemplo, veremos cómo se crea el punto de referencia que se convertirá en el amarre del cable al carro, el cual anteriormente denominamos 1c. Una vez que hemos seleccionado la opción *Coord*, pinchamos sobre el elemento en el que queremos situar un amarre del cable, en este caso el carro, creando un punto en una posición aleatoria de dicho elemento (**Figura 4.125**).

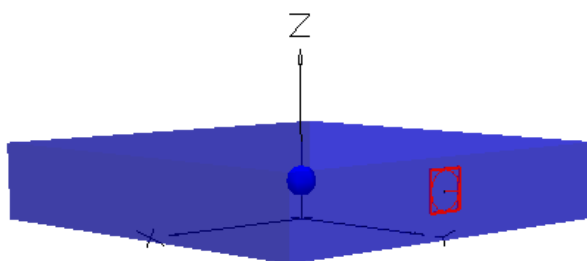


Figura 4.125: *Coord* creado en el carro

A continuación, hacemos doble *click* sobre el punto creado e introducimos las coordenadas de dicho punto respecto al sistema de coordenadas del carro, así como el nombre que le queramos poner. La posición del punto en ejes del carro será la que se muestra en la **Figura 4.126**.

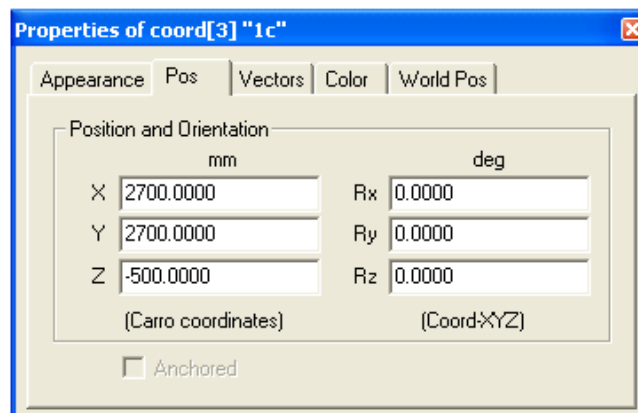


Figura 4.126: Introducción de las coordenadas del *Coord* creado en referencia al centro geométrico del carro

Una vez que hemos creado todos los puntos de amarre de los cables, nos dispondremos a construir los distintos resortes que simularán dichos cables. Para realizar esta tarea, comenzaremos seleccionando uno de los puntos de amarre creados y, a continuación, pinchamos en la opción *Create Constraint* del menú *Object* (Figura 4.127).

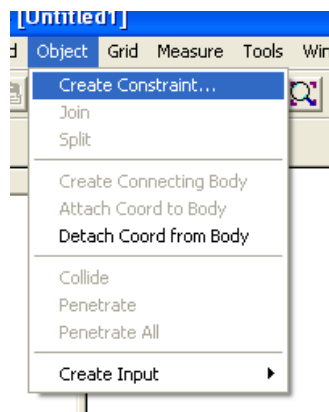


Figura 4.127: Selección de la función *Create Constraint*

Se nos abrirá una ventana, en la que podremos elegir el tipo de actuador o ligadura, así como los puntos en los que actuará. Si utilizamos como ejemplo la creación del cable 1, los datos que debemos introducir en dicha ventana, serían los que se observan en la Figura 4.128.

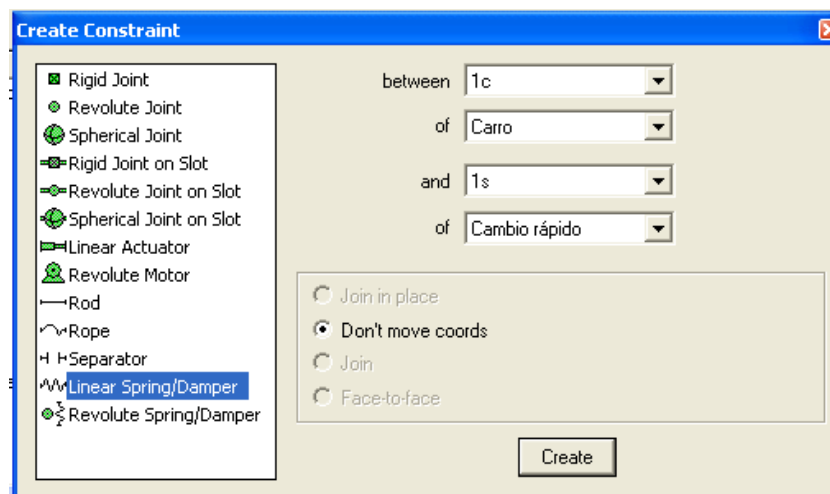


Figura 4.128: Selección de las distintas opciones para la creación del resorte que simulará el cable 1 dentro de la función *Create Constraint*

A continuación, pinchamos en *Create* y ya tendremos nuestro resorte (Figura 4.129).



Figura 4.129: Aspecto del resorte creado para simular el cable 1

Si hacemos doble *click* sobre el resorte creado, nos aparecerá una ventana en la que podremos introducir las distintas propiedades que definirán el comportamiento del mismo, como por ejemplo la constante elástica o la longitud natural. Podemos ver esto en la Figura 4.130.

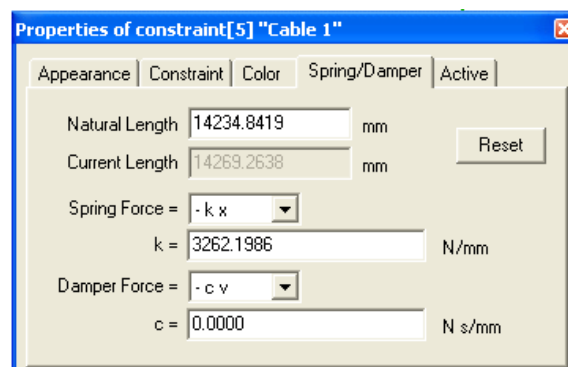


Figura 4.130: Introducción de las propiedades del resorte que simula el cable 1

Realizamos la misma operación con el resto de cables, obteniendo el sistema que se muestra en la **Figura 4.131**.

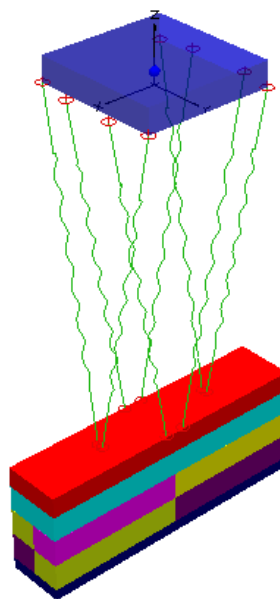


Figura 4.131: Aspecto del sistema con todos los resortes creados

El siguiente paso, es crear las distintas restricciones que mantendrán unidos de forma rígida los diferentes elementos que conforman la carga suspendida. Esta tarea, se realiza de forma muy parecida a la construcción de los resortes: en primer lugar creamos una serie de puntos de referencia con la función *Coord*, en los lugares de unión de los distintos elementos. A continuación, nos vamos al menú *Object* → *Create Constraint* y, en la ventana que nos aparece, elegiremos la opción *Rigid Joint* (como ejemplo se muestra la **Figura 4.132**, en la cual se puede ver la unión entre el cambio rápido y el *spreader*).

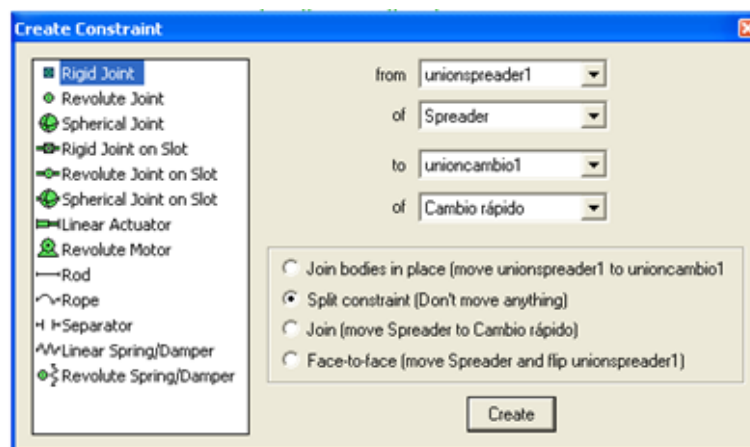


Figura 4.132: Opciones elegidas para la creación del *Rigid Joint* que une *spreader* y cambio rápido dentro de la función *Create Constraint*

Seguidamente, crearemos la restricción que hará que el carro se mueva en la dirección que creamos conveniente. Para ello, usaremos de nuevo la función *Coord* para crear un punto de referencia en el centro geométrico del carro (el cual llamaremos *centro geométrico*), de manera que sea este punto, el que circule por la “vía” que a continuación construiremos.

Seleccionamos ahora el carro, y nos vamos una vez más al menú *Object* → *Create Constraint*. En dicho menú, seleccionamos la restricción *Rigid Joint on Slot* con los datos que se exponen en la Figura 4.133.

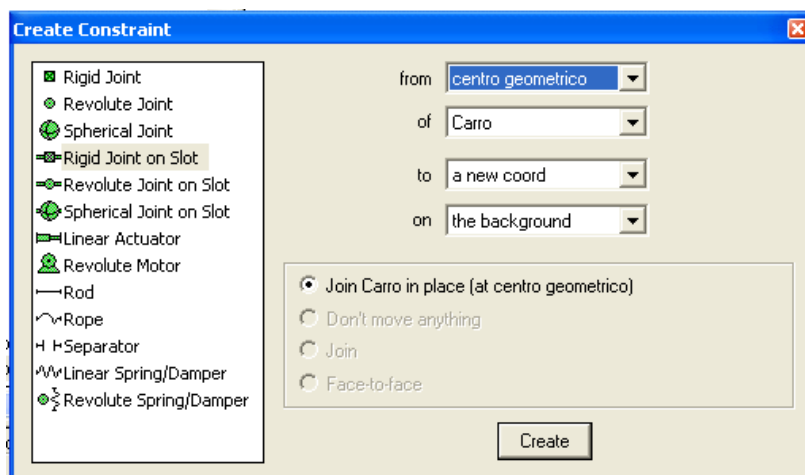
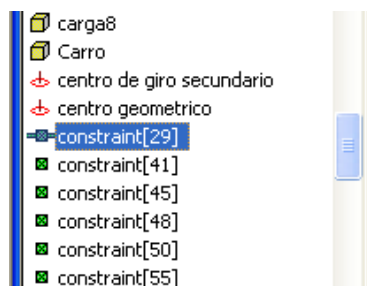
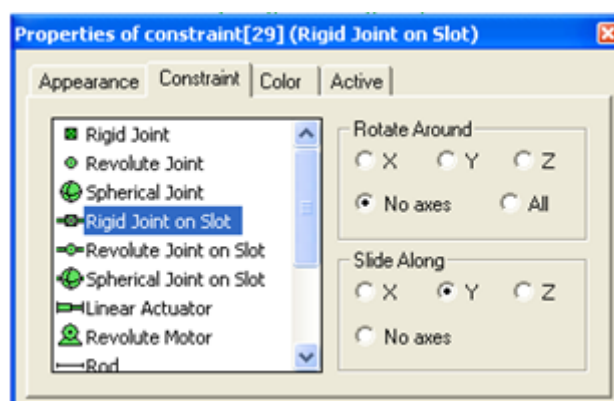


Figura 4.133: Opciones elegidas para la creación del *Rigid Joint on Slot* dentro de la función *Create Constraint*

Pinchamos en *Create*, y ya tendremos construida una “vía” por la que circulará nuestro carro. A continuación, debemos indicar la dirección exacta de la restricción que hemos creado. Para ello, hacemos doble *click* sobre dicha restricción, que en este caso el programa ha denominado *constraint[29]* (Figura 4.134).

Figura 4.134: Selección del *Rigid Joint on Slot* creado

Nos aparecerá una ventana, en la que podremos introducir la dirección en la que se moverá nuestro carro. En este caso, elegimos que el carro se mueva en dirección y, por lo que seleccionamos las opciones que se observan en la **Figura 4.135**.

Figura 4.135: Opciones elegidas para el correcto funcionamiento del *Rigid Joint on Slot* creado

Por último, queda por crear el actuador, que se encargará de transmitir la aceleración oportuna al carro. De nuevo, nos valdremos de la opción *Coord* para establecer dos puntos de referencia, uno sobre el carro (punto sobre el cual se inducirá la aceleración en dicho elemento) y otro fuera de él (que sirva de anclaje del actuador en el espacio). Ambos puntos, deben estar alineados en la dirección en la que queramos que se mueva el carro. Llamaremos a dichos puntos *actuador carro* (punto sobre el carro) y *actuador espacio* (punto de anclaje en el espacio).

Una vez hemos creado los dos puntos antes mencionados, seleccionamos el punto *actuador carro* y nos vamos al menú *Object* → *Create Constraint*. Nos aparecerá una ventana, en la que seleccionaremos la opción *Linear Actuator*, junto con la información que se expone en la **Figura 4.136**.

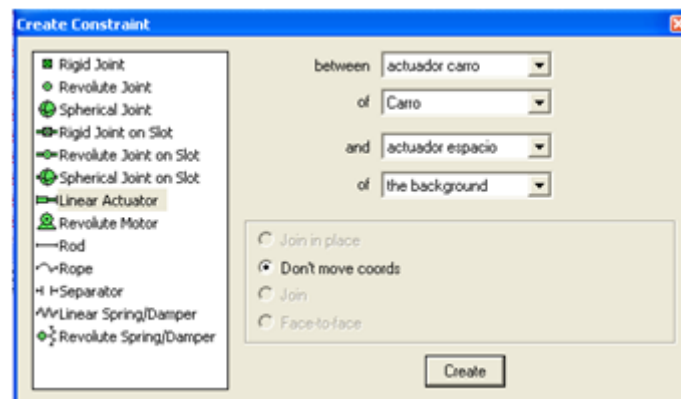


Figura 4.136: Opciones elegidas para la creación del *Linear Actuator* dentro de la función *Create Constraint*

Pinchamos en *Create*, y ya tendremos creado nuestro actuador (**Figura 4.137**).

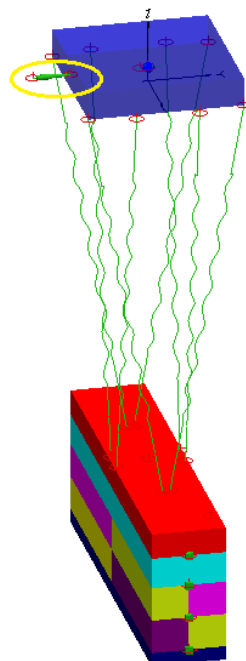


Figura 4.137: Aspecto del *Linear Actuator* creado en el modelo

Cuando queramos cambiar las propiedades de nuestro actuador (para inducir velocidad, fuerza, aceleración, etc. con sus correspondientes valores numéricos), haremos doble *click* sobre él, al igual que hemos explicado con otros elementos del modelo.

Ya tendríamos creados todos los elementos necesarios para nuestro modelo. Lo que vamos a hacer ahora, es introducir la condición necesaria para que los cables sólo trabajen a tracción. Para ello, usaremos como ejemplo el cable 1. Si hacemos doble *click* sobre dicho

cable y seleccionamos la pestaña *Active*, nos encontraremos con la ventana que se ve en la **Figura 4.138**.

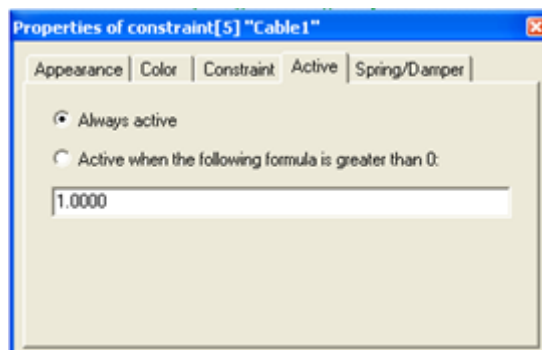


Figura 4.138: Pestaña *Active* dentro de la ventana de propiedades del cable 1

Para que el resorte sólo trabaje a tracción, debemos marcar la opción *Active when the following formula is greater than 0*, e introducir la fórmula que se observa en la **Figura 4.139**.

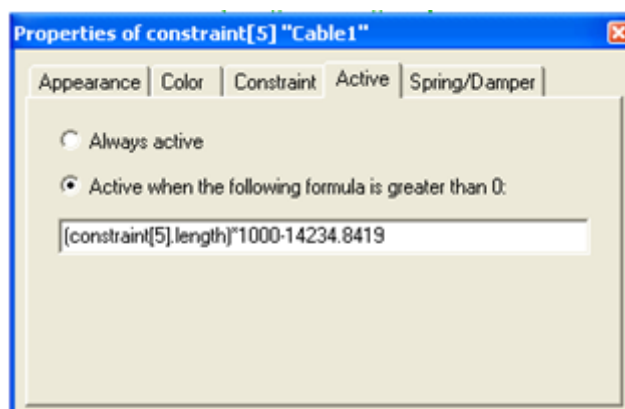


Figura 4.139: Opciones y expresión introducidas en la ventana *Active* de la ventana de propiedades del Cable 1 para que éste sólo trabaje a tracción

Siendo el comando *constraint[5].length* la longitud instantánea del resorte en *m* y 14234.8419 la longitud natural del muelle en *mm*. Con esta fórmula, le indicamos al programa que el resorte sólo esté activo si su longitud instantánea es mayor que su longitud natural.

Cada vez que tengamos que cambiar la longitud natural del muelle, deberemos venir a esta ventana y cambiar dicha longitud.

2.2 AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE PRECISIÓN DE LA SIMULACIÓN Y DEL TIEMPO EN EL QUE DICHA SIMULACIÓN SE DEBE DETENER

Al igual que en el 2D, ajustaremos los parámetros de precisión de las simulaciones. Lo haremos entrando en el menú *World* y pinchando en la opción *Accuracy* (Figura 4.140).

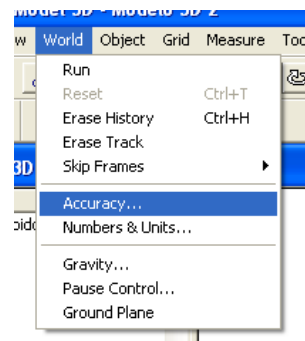


Figura 4.140: Selección de la función *Accuracy*

En la ventana que nos aparece, elegimos los valores que se muestran en la Figura 4.141.

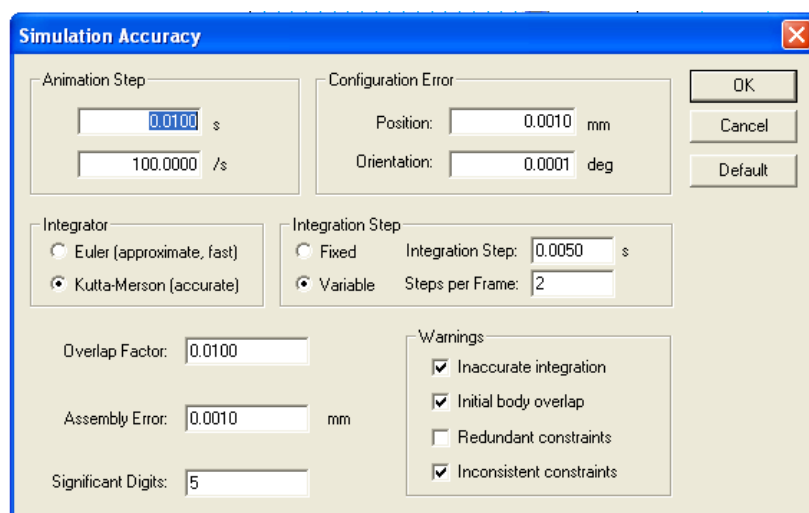


Figura 4.141: Opciones y valores elegidos para las simulaciones dentro de la función *Accuracy*

Para ajustar el tiempo de simulación, nos vamos de nuevo al menú *World* y seleccionamos la opción *Pause Control* (Figura 4.142).

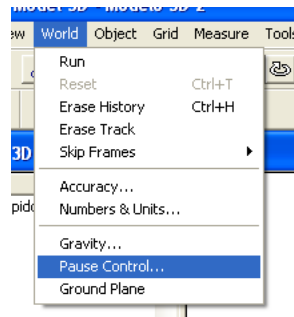


Figura 4.142: Selección de la función *Pause Control*

Decidimos que la simulación entre en pausa después de 25 segundos desde su inicio, por lo que introducimos la información que se observa en la **Figura 4.143**, en la ventana que aparece.

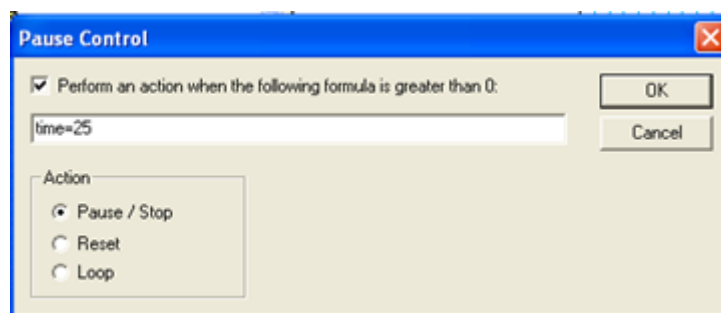
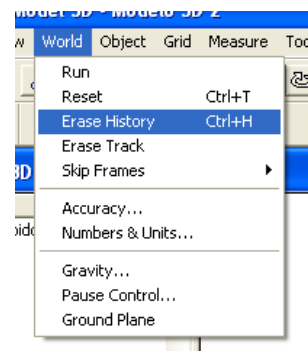


Figura 4.143: Opciones elegidas para las simulaciones dentro de la función *Pause Control*

2.3 POSICIÓN INICIAL

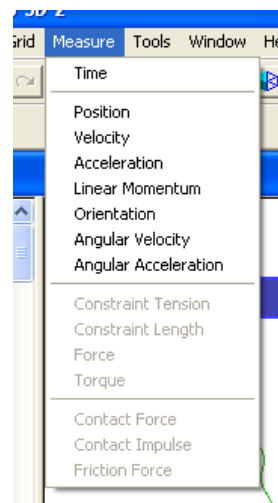
Calcularemos la posición de equilibrio inicial de la carga suspendida, del mismo modo que lo hacíamos en el 2D cuando teníamos carga descentrada, ya que el programa tiene una función parecida al *Start Here* de *Working Model 2D*. La diferencia es que, en *Working Model 3D*, se denomina *Erase History* (**Figura 4.144**).

Figura 4.144: Selección de la función *Erase History*

En el 3D, será más costoso llegar a la posición de equilibrio, ya que ahora tenemos 6 parámetros de posición y giro, en vez de los 3 que teníamos en 2D.

2.4 OBTENCIÓN DE LOS DATOS

La obtención de los distintos datos, se realiza de forma muy parecida al 2D. Primero seleccionamos el elemento sobre el que queremos sacar alguna información. A continuación, nos vamos al menú *Measure* y seleccionamos el parámetro que queremos observar. Por ejemplo, nosotros hemos seleccionado el carro, dándonos el menú *Measure* las opciones que se exponen en la **Figura 4.145**.

Figura 4.145: Opciones ofrecidas por el menú *Measure* cuando tenemos seleccionado el carro

Una vez que hemos seleccionado la información que queremos ver o exportar, ponemos a correr la simulación. Cuando la simulación ha acabado, si queremos exportar la evolución de

algún parámetro de los seleccionados, deberemos ir al menú *File* → *Export Meters* (Figura 4.146).

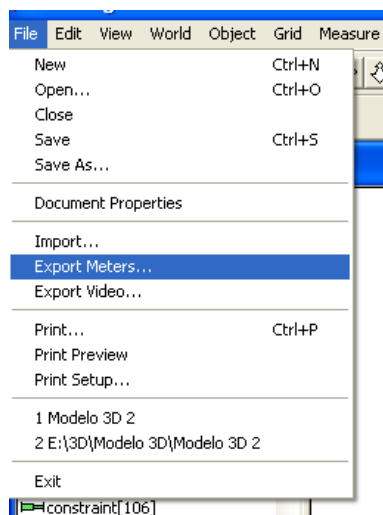


Figura 4.146: Selección de la función *Export Meters*

A continuación, se nos abrirá una ventana en la que podremos seleccionar los datos que queremos exportar, el lugar donde los queremos guardar, etc. Los datos se exportan en formato *.txt*, por lo que, por último, tendremos que introducirlos en *Excel* para construir las gráficas necesarias y extraer la información que sea pertinente.



CAPÍTULO 5

Resultados de las simulaciones en 2D

Recordemos que en la parte 2D, sólo realizaremos simulaciones aplicando aceleración al sistema en la dirección del carro. Dicha aceleración tendrá un valor de $0,2 \text{ m/s}^2$ y será aplicada en el sentido positivo del eje x. En la **Figura 5.147** se muestra, a modo de recordatorio, el sistema a simular en 2D, con el sistema de coordenadas que se utilizará en dichas simulaciones, así como el nombre que toman los distintos cables.

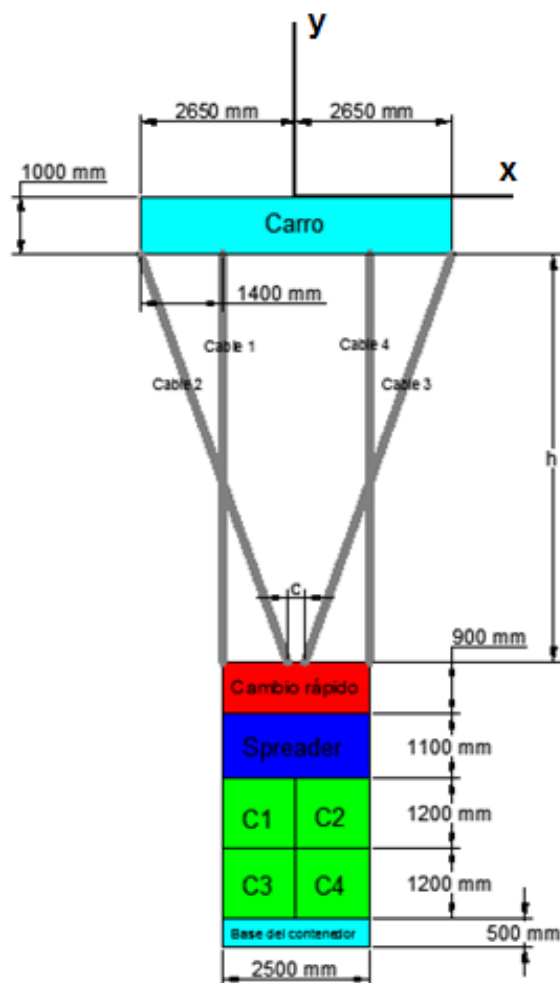


Figura 5.147: Disposición en el plano de los distintos elementos que formarán el modelo en *Working Model 2D* con sus correspondientes cotas

Como ya se señaló en capítulos anteriores, tomaremos el centro de masa (CM) de la carga suspendida como referencia para el cálculo de desplazamientos de la misma.

En la **Tabla 3.5 y 3.6**, en el Capítulo 3, se exponen los distintos resultados que se van a sacar de las simulaciones, con su correspondiente nomenclatura.

1 ANÁLISIS DE LAS PRIMERAS SIMULACIONES

Comenzaremos realizando una simulación inicial, tomando como distribución de carga la del caso 2 y la del caso 4, para tener un caso en el que la carga está centrada y otro en el que está descentrada. Para ambos, usaremos una altura de suspensión de la carga $h=8000\text{ mm}$ y un cruzamiento $c=200\text{ mm}$.

La intención de estas simulaciones iniciales, es darnos una idea de los órdenes de magnitud de los valores de distintos resultados de desplazamiento, giro y aceleraciones que nos interesan. Sobre todo, queremos comprender en primera instancia el movimiento que nos vamos a encontrar.

Como punto de toma de medidas de desplazamientos de la carga suspendida, y para todas las simulaciones en 2D, tomaremos el centro de masa del conjunto que forma la carga suspendida (cambio rápido, *spreader* y contenedor).

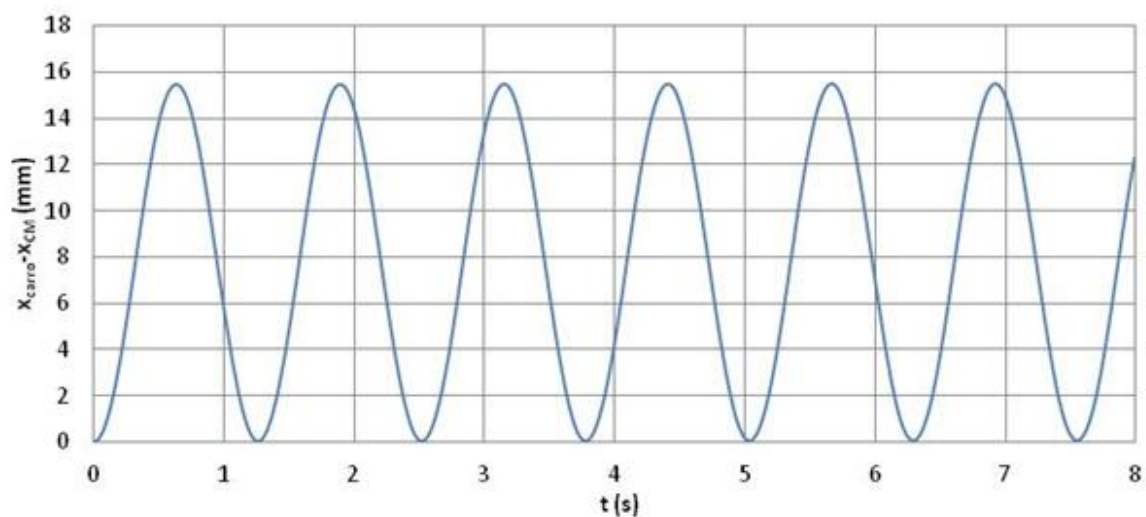
El sistema partirá del reposo, induciendo a continuación una determinada aceleración en el carro, que será constante durante todo el tiempo de simulación. Éstas son las condiciones que usaremos para todas las simulaciones en 2D. Utilizaremos una aceleración en la carro $a_{\text{carro}}=0,2\text{ m/s}^2$, un valor característico para las grúas que estamos estudiando. Fijaremos un tiempo máximo de simulación de 8 segundos, tiempo típico en el que dichas grúas se encuentran en fase de aceleración.

Si es necesario, realizaremos una transformada de Fourier de los resultados que sea conveniente para una mejor compresión del movimiento.

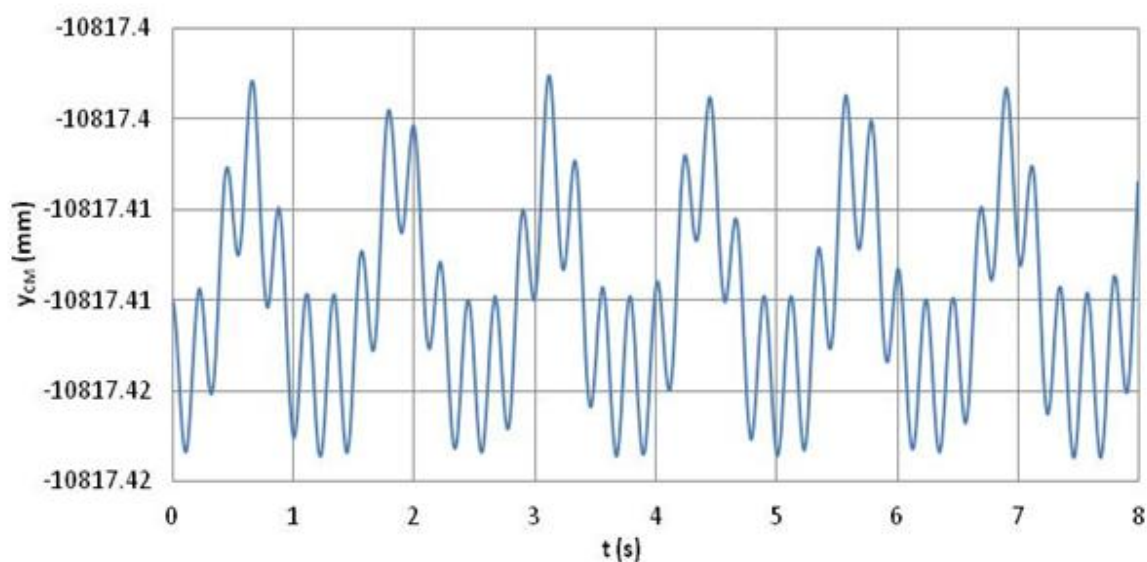
Comenzamos pues, con el análisis de los resultados de estas primeras simulaciones.

1.1 CASO 2: carga centrada con CM alto

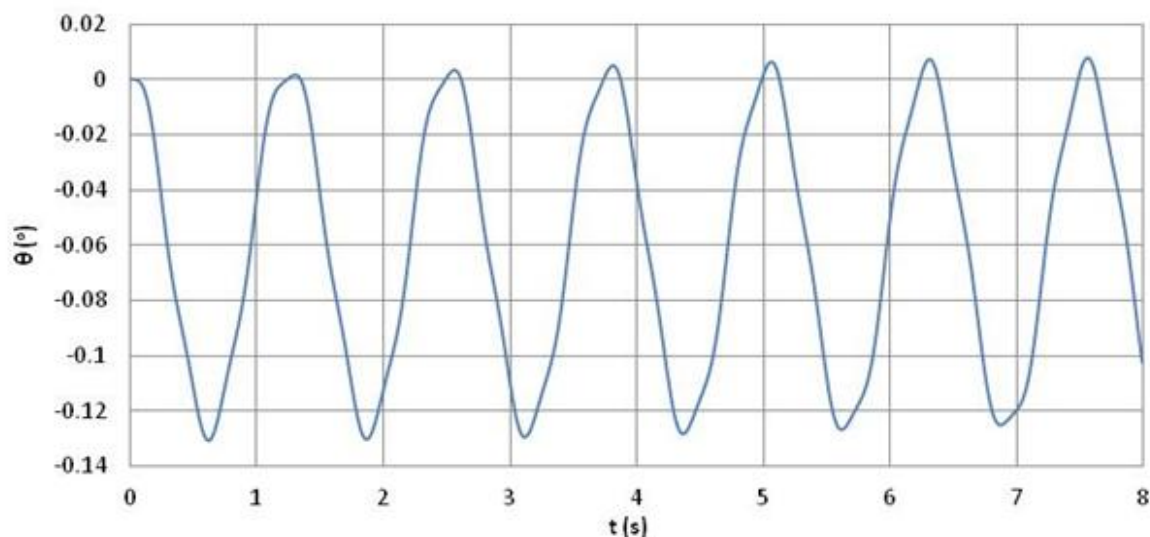
Si representamos la posición relativa en x de la carga suspendida ($x_{\text{carro}}-x_{\text{CM}}$), la posición en y (y_{CM}) y el giro (θ) en función del tiempo, obtenemos las curvas que se pueden ver en las Gráficas 5.1, 5.2 y 5.3.



Gráfica 5.1: Posición relativa en x del centro de masa de la carga suspendida ($x_{\text{carro}} - x_{\text{CM}}$) en función del tiempo



Gráfica 5.2: Posición en y del centro de masa de la carga suspendida en función del tiempo



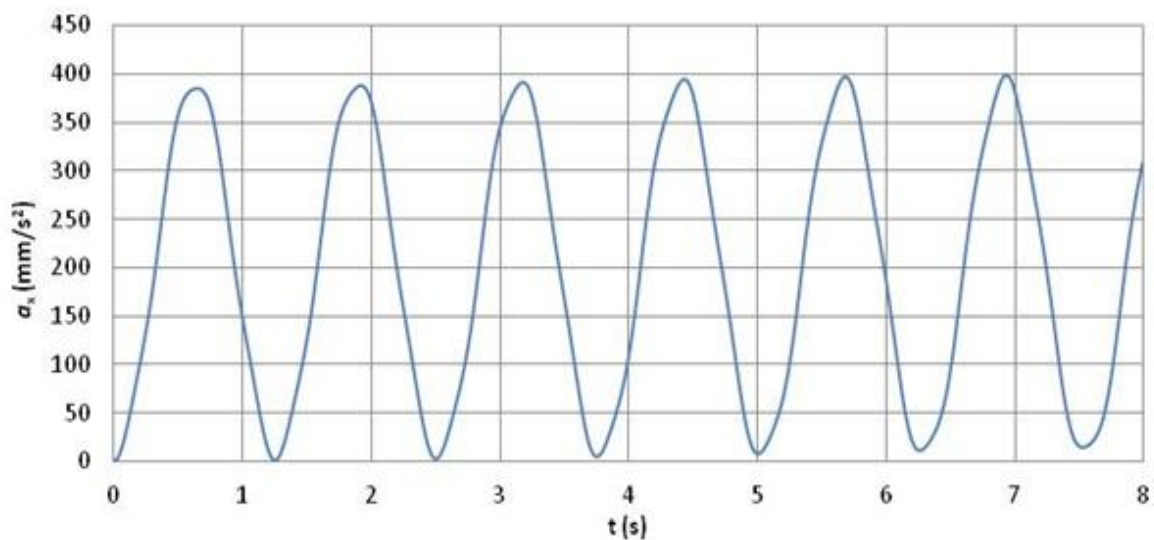
Gráfica 5.3: Giro de la carga suspendida en función del tiempo

A primera vista, se puede observar que la amplitud de las vibraciones en dirección vertical es bastante pequeña si las comparamos con la de las vibraciones en el eje horizontal, algo que sucederá también en el resto de simulaciones en 2D. Debido a esto, a partir de ahora, para la toma de medidas en las simulaciones sólo tendremos en cuenta el movimiento horizontal y el giro de la carga suspendida.

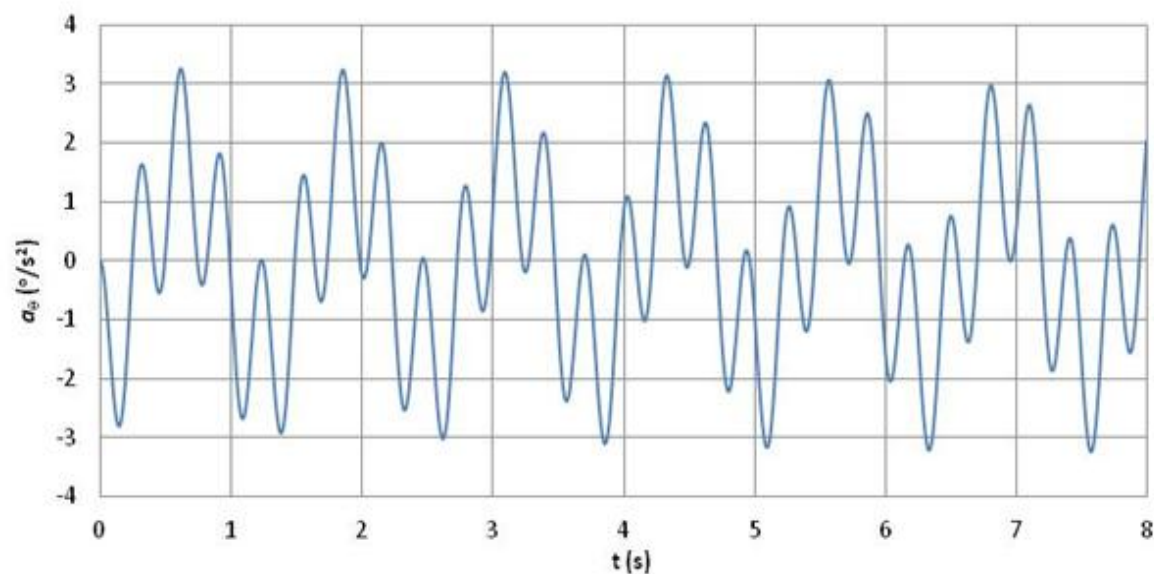
Si nos fijamos más detenidamente en la gráfica de posición relativa en el eje x , podríamos decir, en una primera aproximación, que el movimiento en dicha dirección únicamente se compone de un armónico, puesto que observamos un seno bastante limpio. Sin embargo, si nos fijamos en la gráfica de giro, vemos que el seno que obtenemos ya no es tan limpio como el anteriormente mencionado.

Dicho esto, en primera instancia, podemos decir que el movimiento de la carga suspendida podría componerse de un armónico que llamaremos principal (y que en este caso tiene un periodo de 1,26 s) y algún otro armónico, el cual tenemos que identificar.

Para ver la composición de armónicos con mayor claridad, en la **Gráfica 5.4 y 5.5** representamos los valores de la componente x de la aceleración (a_x) y de la aceleración angular (a_θ) de la carga suspendida en función del tiempo. Hacemos esto porque la aceleración (que es la derivada doble del desplazamiento), actúa a modo de amplificador de los armónicos de mayor frecuencia, por lo que podremos diferenciarlos mejor.



Gráfica 5.4: Componente x de la aceleración del centro de masa de la carga suspendida en función del tiempo

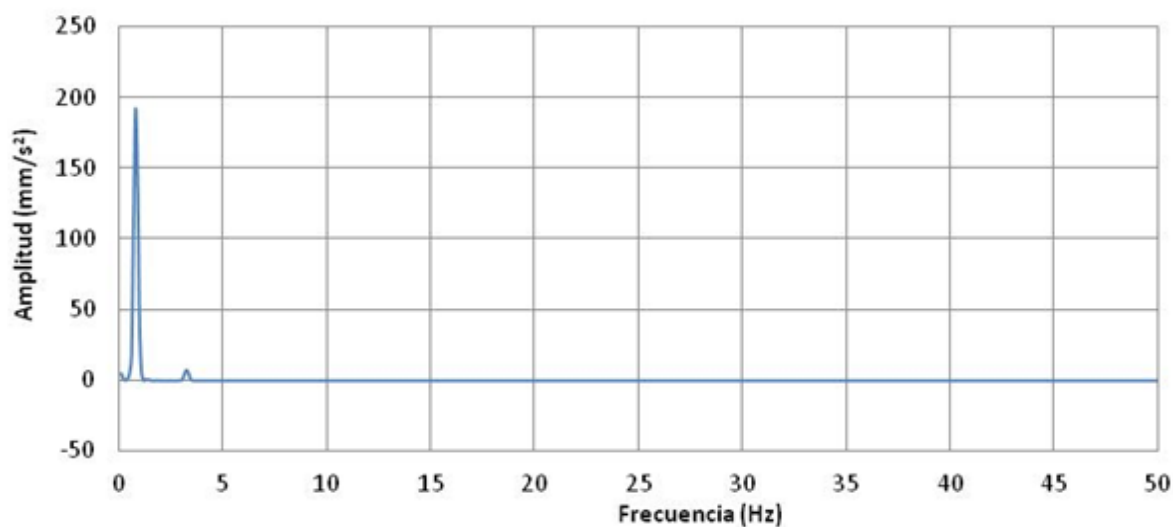


Gráfica 5.5: Aceleración angular de la carga suspendida en función del tiempo

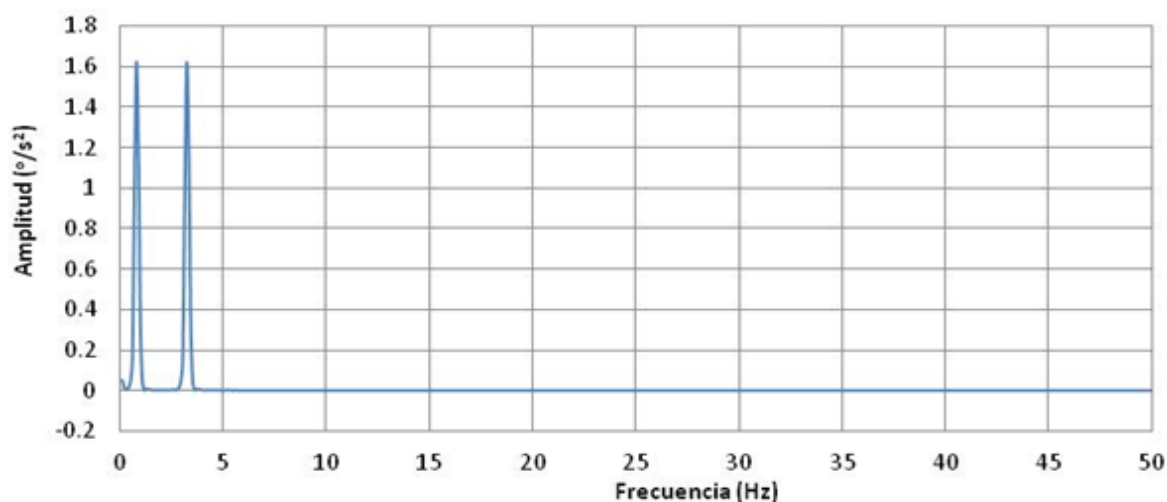
En base a lo mostrado en las Gráficas 5.4 y 5.5, sobre todo en la de aceleración angular, podríamos decir que el movimiento se compone de dos armónicos que parecen dominantes: un armónico que podríamos considerar principal, que en este caso tiene un periodo de 1,26 s,

y otro armónico que llamaremos secundario, con un periodo en torno a 0,3 s, bastante más pequeño que el anterior.

Para asegurarnos de que la deducción anterior es cierta, realizaremos un análisis rápido de Fourier de la componente x de la aceleración del centro de masa de la carga suspendida y de la aceleración angular de dicha carga, para lo que usaremos el programa *Sigview*. Esto nos permitirá distinguir con total claridad los armónicos que forman el movimiento. Dichos análisis se exponen en las **Gráficas 5.6 y 5.7**.



Gráfica 5.6: Análisis rápido de Fourier de la componente x de la aceleración del centro de masa de la carga suspendida



Gráfica 5.7: Análisis rápido de Fourier de la aceleración angular de la carga suspendida

Si miramos los análisis de Fourier anteriormente mencionados, podemos afirmar que, efectivamente, el movimiento de la carga está compuesto por dos armónicos, uno que consideraremos principal y otro secundario.

En resumen, cuando la carga está centrada (lo podremos comprobar también en simulaciones sucesivas), el movimiento de la carga suspendida se compone de 2 armónicos, los cuales definimos a continuación:

- **Armónico principal:** de mayor periodo. Producido por la oscilación pendular o balanceo principal de la carga.
- **Armónico secundario:** de menor periodo. Debido al movimiento de cabeceo que presenta la carga suspendida y en el que tiene mucho que ver la posición en y del centro de masa de dicha carga. Este armónico afecta mucho más al giro de la carga que a su desplazamiento horizontal, donde es prácticamente inapreciable. Debido a esto solo analizaremos el efecto que tiene dicho armónico en el giro.

Podemos sacar alguna conclusión más sobre lo visto anteriormente, como por ejemplo, que el máximo valor de la aceleración del armónico principal, es cercano al doble de la aceleración del carro. Esto será una constante a lo largo de todas las simulaciones.

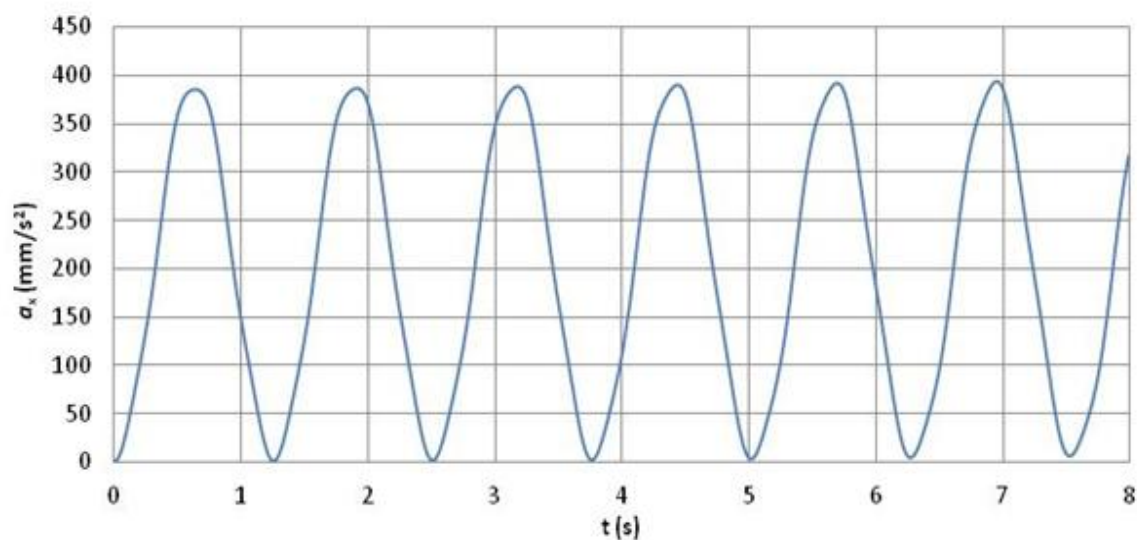
Vemos también, que el periodo de oscilación del armónico correspondiente al movimiento pendular de la carga, es mucho menor al que correspondería a un péndulo simple con esa altura, el cual estaría (para pequeñas oscilaciones) en torno a:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h}{g}} = 5,67 \text{ s}$$

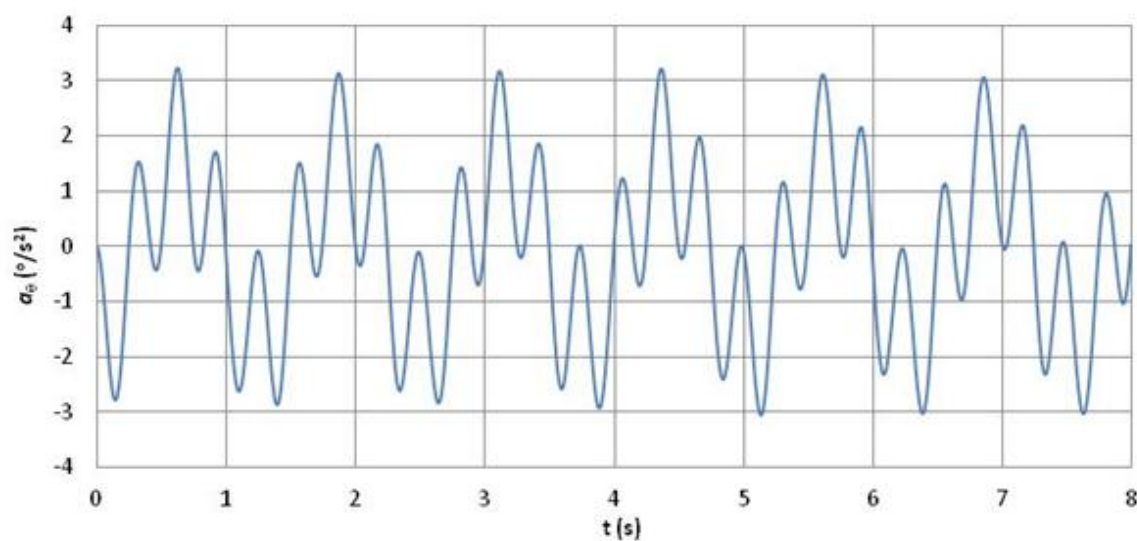
Esto nos da una primera idea de la rigidez de nuestro sistema.

1.2 CASO 4: carga descentrada en +x con CM alto

Para este caso, pasamos a mostrar directamente los resultados de componente x de la aceleración y la aceleración angular de la carga suspendida. Las gráficas de dichas variables en función del tiempo están expuestas en las **Gráficas 5.8 y 5.9**.

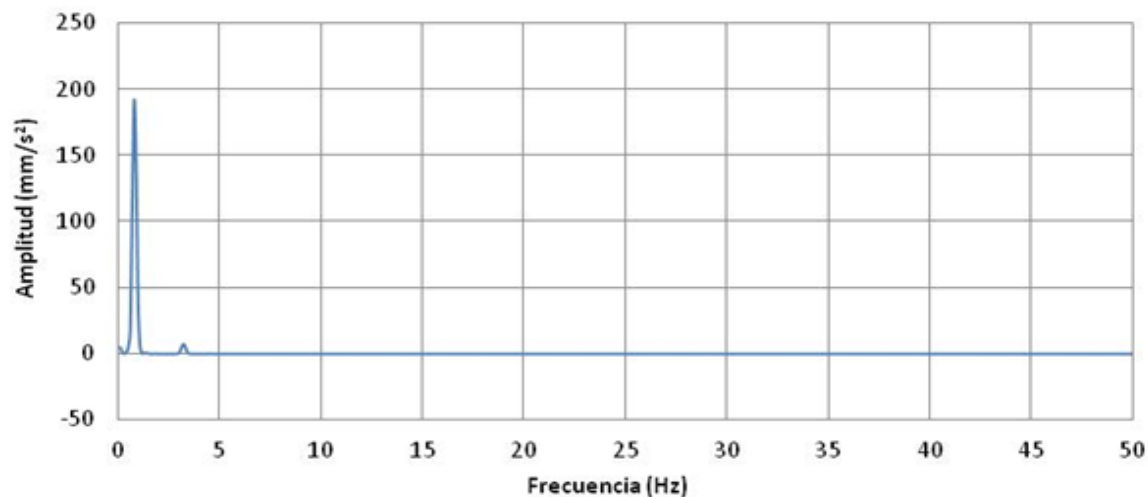


Gráfica 5.8: Componente x de la aceleración del centro de masa de la carga suspendida en función del tiempo

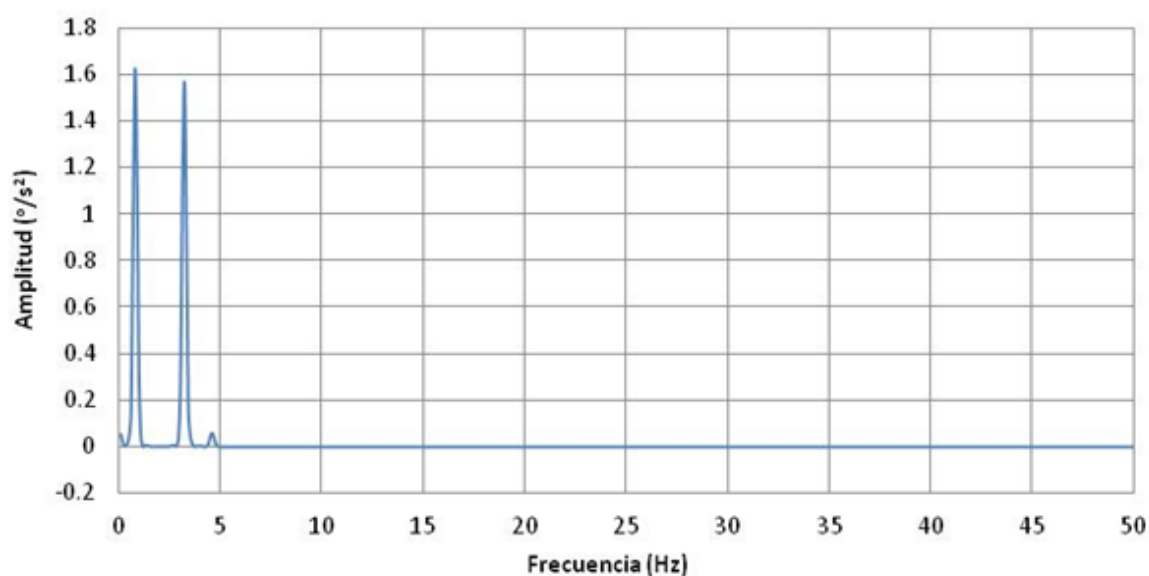


Gráfica 5.9: Aceleración angular de la carga suspendida en función del tiempo

A primera vista, podríamos decir que el estilo de movimiento se asemeja bastante al visto con carga centrada. Sin embargo, vamos a hacer un análisis de Fourier de ambas variables para ver de forma definitiva los armónicos que conforman el movimiento. Dichos análisis se pueden observar en las **Gráficas 5.10 y 5.11**.



Gráfica 5.10: Análisis rápido de Fourier de la componente x de la aceleración del centro de masa de la carga suspendida



Gráfica 5.11: Análisis rápido de Fourier de la aceleración angular de la carga suspendida

En este caso, vemos que aparece un tercer armónico en la composición del movimiento, con una mayor frecuencia que los armónicos que anteriormente definimos como principal y secundario. Dicho armónico, podría deberse al descentramiento de la carga en el eje x.

Por tanto, cuando la carga está descentrada, tendremos los siguientes armónicos implicados en el movimiento del sistema:

- **Armónico principal:** debido al balanceo principal de la carga suspendida.
- **Armónico secundario:** consideraremos como armónico secundario el de segunda mayor frecuencia en el giro. Como en el caso anterior, es debido al cabeceo de la carga suspendida y afecta principalmente al giro, por lo que únicamente analizaremos el efecto de dicho armónico en la variable citada.
- **Tercer armónico:** consideraremos como tercer armónico el de mayor frecuencia. Surge cuando la carga está descentrada en x . Al igual que el armónico secundario, tiene un efecto inapreciable en el desplazamiento horizontal y muy pequeño en el giro, salvo excepciones que aclaramos a continuación.

Como hemos podido comprobar en las simulaciones posteriores, el tercer armónico no produce un efecto reseñable, salvo para alturas de suspensión comprendidas entre 5000 y 8000 mm , alturas no muy representativas para nuestro análisis. En dichas alturas, el sistema es más nervioso y la amplitud del giro del tercer armónico es equiparable a la del segundo, para los valores más negativos de cruzamiento. Sin embargo, en el resto de alturas, la amplitud del giro producido por este tercer armónico es prácticamente inapreciable. El efecto en el desplazamiento horizontal es nulo, y en el vertical no lo tenemos en cuenta por razones que ya hemos señalado.

Debido a todo lo expuesto antes, **decidimos no tener en cuenta el tercer armónico** para el análisis de nuestro sistema.

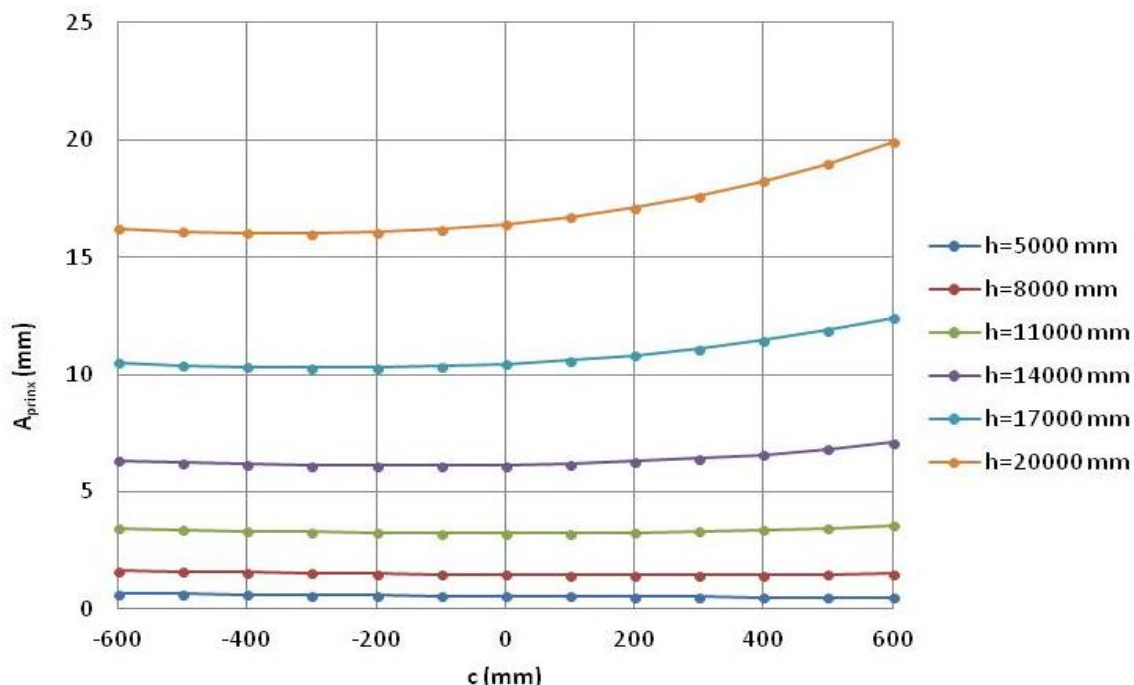
2 RESULTADOS FINALES

En este apartado, se mostrarán los resultados de amplitud y periodos de los armónicos, así como los de tensiones máximas obtenidas en las simulaciones realizadas en 2D. En dichas simulaciones, variaremos el valor del cruzamiento c y la altura de suspensión h para cada caso de distribución de la carga.

Es importante señalar que, a la hora de representar la amplitud del giro de los armónicos principal y secundario, consideraremos dicho valor de amplitud positivo si al arrancar la simulación, la carga comienza a girar en el sentido opuesto a las agujas del reloj en lo referente a dicho armónico. Caso contrario, la amplitud del giro será negativa. Decidimos tomar este criterio de signos en dichas amplitudes para una mayor claridad en las gráficas.

2.1 CASOS CON CARGA CENTRADA

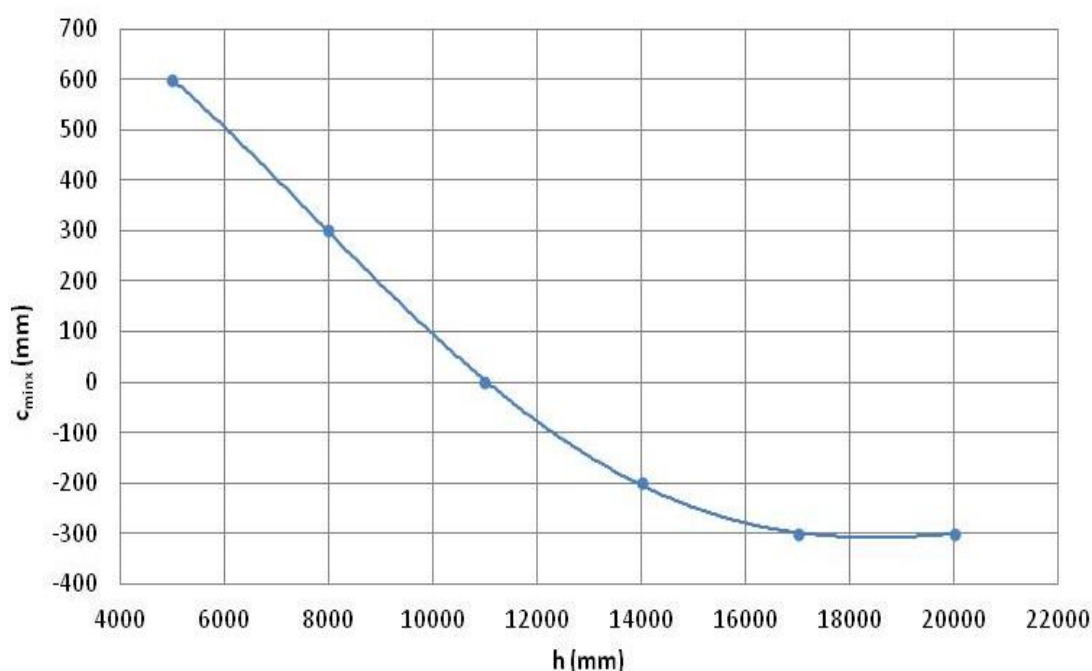
2.1.1 CASO 1: contenedor vacío



Gráfica 5.12: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{pirnx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 1

Comenzaremos representando los resultados correspondientes al armónico principal. Dentro de dicho armónico, primeramente representamos la posición relativa en x de la carga suspendida, en función del cruzamiento y la altura de suspensión, lo cual se expone en la **Gráfica 5.12**.

Como es lógico, las amplitudes van siendo mayores cuanto más grande es la altura de suspensión. Vemos que las distintas curvas que componen la gráfica anteriormente mencionada, tienden a una forma de bañera, con un mínimo para un determinado valor de cruzamiento, que depende de dicha altura de suspensión. Si representamos dichos valores de cruzamiento correspondientes al mínimo valor de amplitud, en función de la citada altura de suspensión, obtenemos la curva que se expone en la **Gráfica 5.13**.

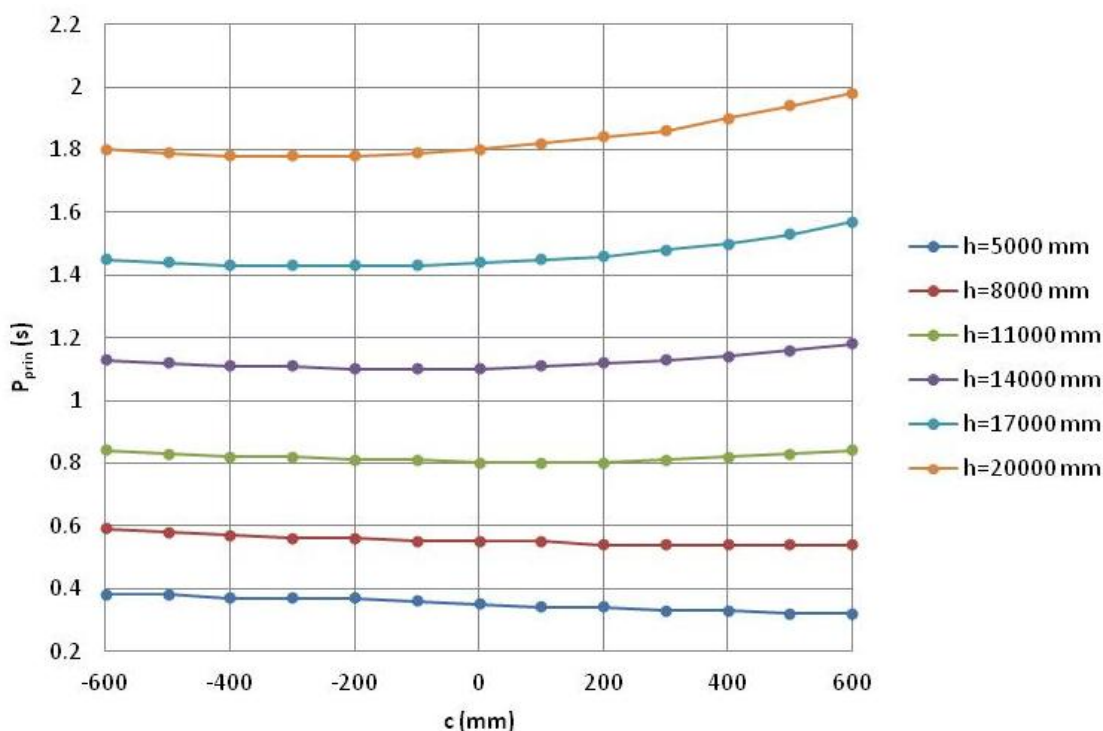


Gráfica 5.13: Curva de cruzamiento para el mínimo valor de amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x de la carga suspendida (c_{minx}) en función de la altura de suspensión para el caso 1

Teniendo en cuenta, que las alturas principales de suspensión para las que queremos obtener buenos resultados, se encuentran entre 11000 y 17000 mm , vemos que, en este caso, el uso de cruzamientos negativos alrededor de -200 mm sería lo más adecuado, si hablamos de mejorar el comportamiento del armónico principal en cuanto a desplazamiento relativo en x .

Veamos ahora la gráfica en la que se muestra la evolución del periodo del armónico principal en función de los parámetros antes señalados. Dichas curvas se encuentran expuestas en la **Gráfica 5.14**.

Se observa que la forma de las curvas de periodos del armónico principal, es la misma que para la amplitud de dicho armónico en referencia a la posición relativa en x . Coinciden incluso los valores del cruzamiento correspondientes a los mínimos de dichas curvas. Este hecho será una constante en todos los casos analizados. Es importante señalar, que no consideraremos los periodos como una variable determinante para la elección del cruzamiento. Esto se debe a que, entre otras cosas, lo que más nos interesa es buscar un cruzamiento que nos minimice, en la medida de lo posible, el valor de las distintas amplitudes. Además, la diferencia entre periodos al variar el valor del cruzamiento no es demasiado importante para un mismo valor de la altura de suspensión.

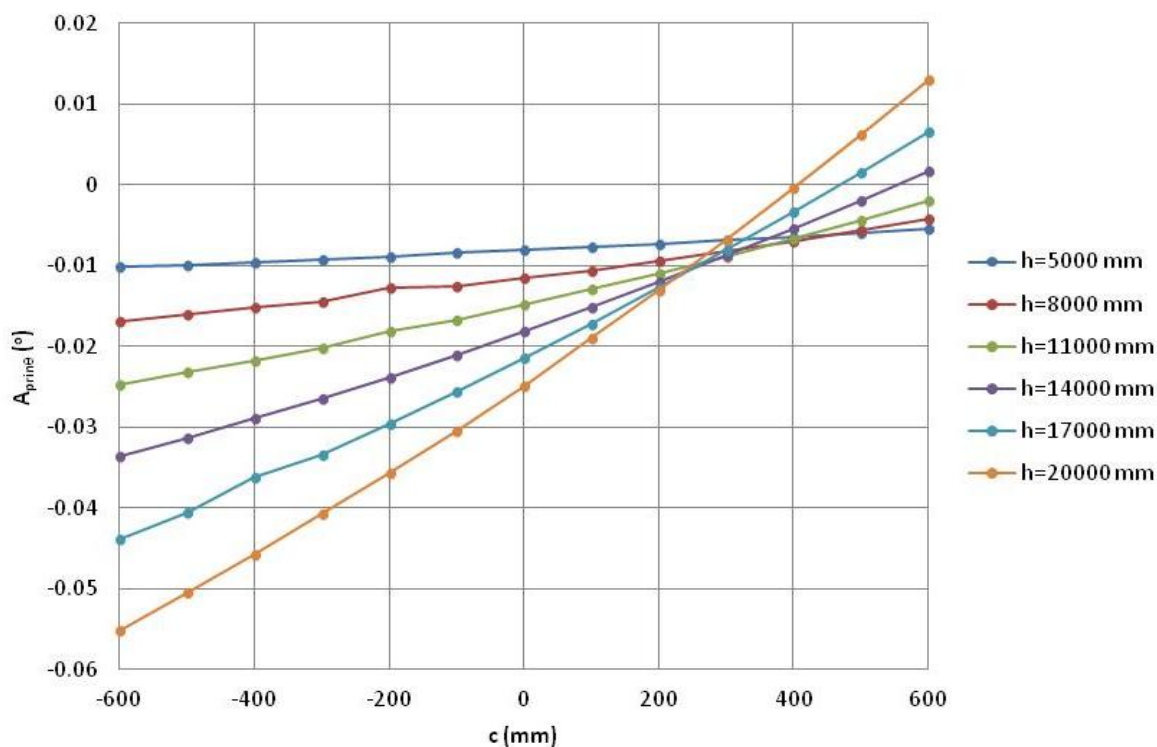


Gráfica 5.14: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 1

Pasamos ahora a analizar la gráfica correspondiente a la variación de la amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida, en función de los distintos parámetros. Dicho gráfico se puede observar en la **Gráfica 5.15**.

En dicha gráfica, podemos concluir, que es una buena opción usar valores de cruzamiento comprendidos en el intervalo entre 400 y 600 mm para obtener un buen comportamiento (giro

nulo) en cuanto a giro en el armónico principal para las alturas de suspensión que más nos interesan.

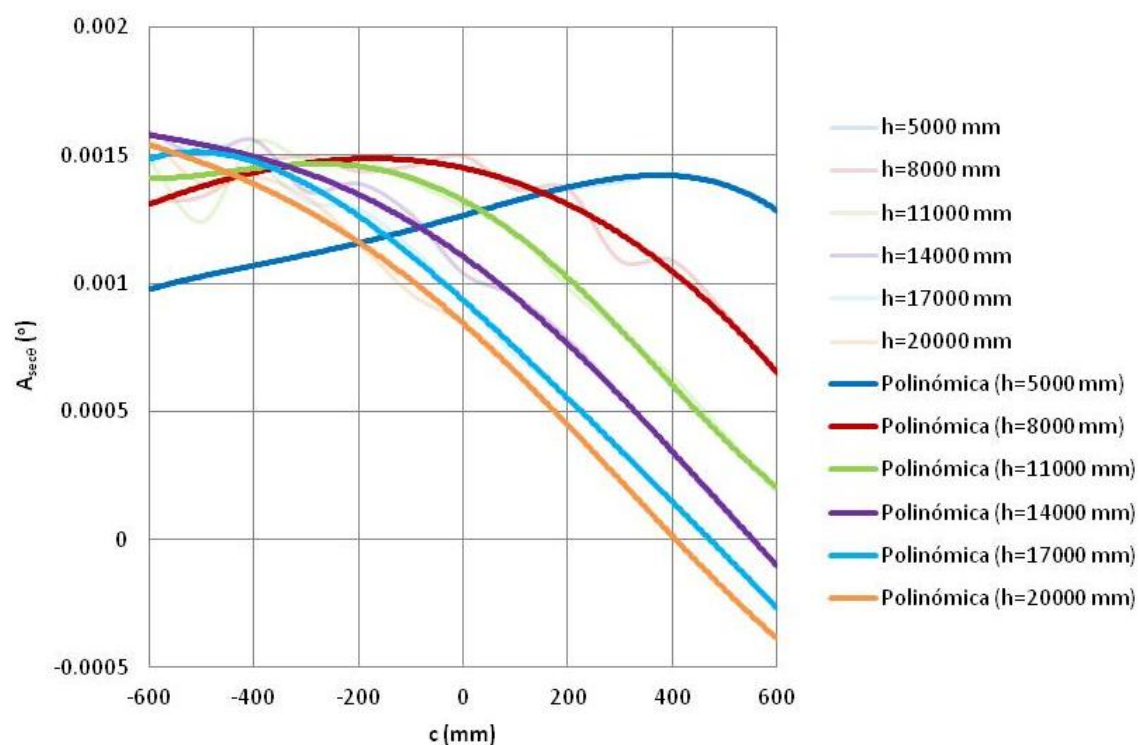


Gráfica 5.15: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{prin\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 1

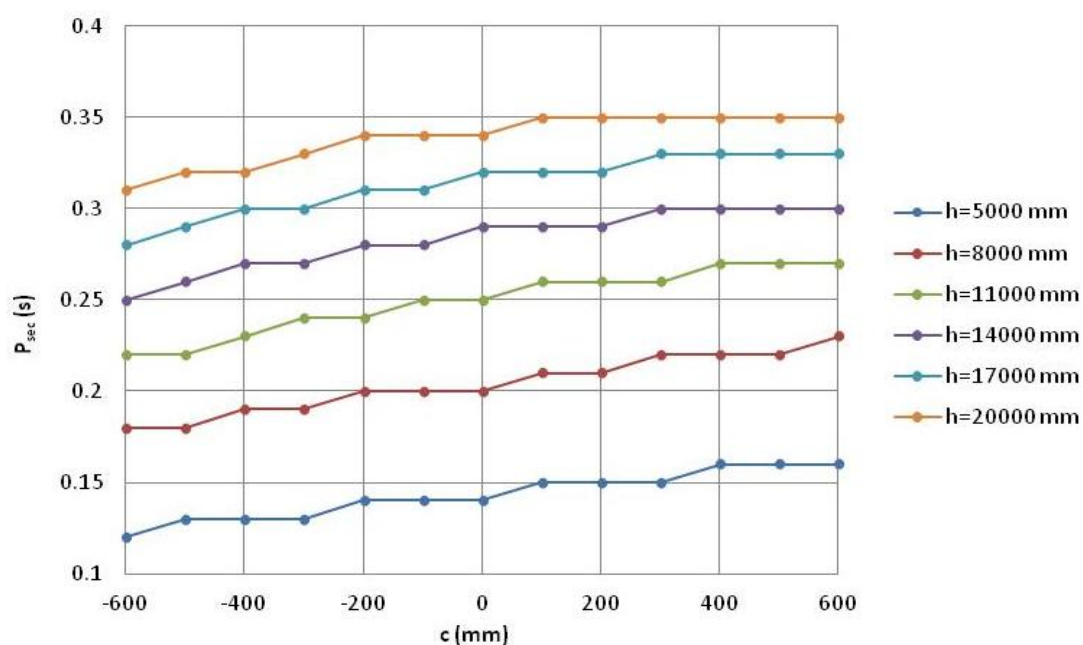
Vamos ahora a analizar los resultados correspondientes al armónico secundario. Comenzamos con la amplitud de dicho armónico en referencia al giro de la carga suspendida, cuyas curvas se encuentran expuestas en la **Gráfica 5.16**.

Se observa que, en general, las curvas poseen una forma de campana, con un máximo en valores de cruzamiento cada vez más pequeños a medida que aumentamos la altura de suspensión. Para alturas comprendidas entre 11000 y 17000 mm, sería conveniente usar valores de cruzamiento alrededor de 500 mm para obtener un buen comportamiento en cuanto a giro del armónico secundario se refiere.

A continuación, pasamos a ver el gráfico de periodos del armónico secundario, el cual se encuentra en la **Gráfica 5.17**. En dicha gráfica, podemos observar que el periodo del armónico secundario aumenta a medida que el cruzamiento es mayor.

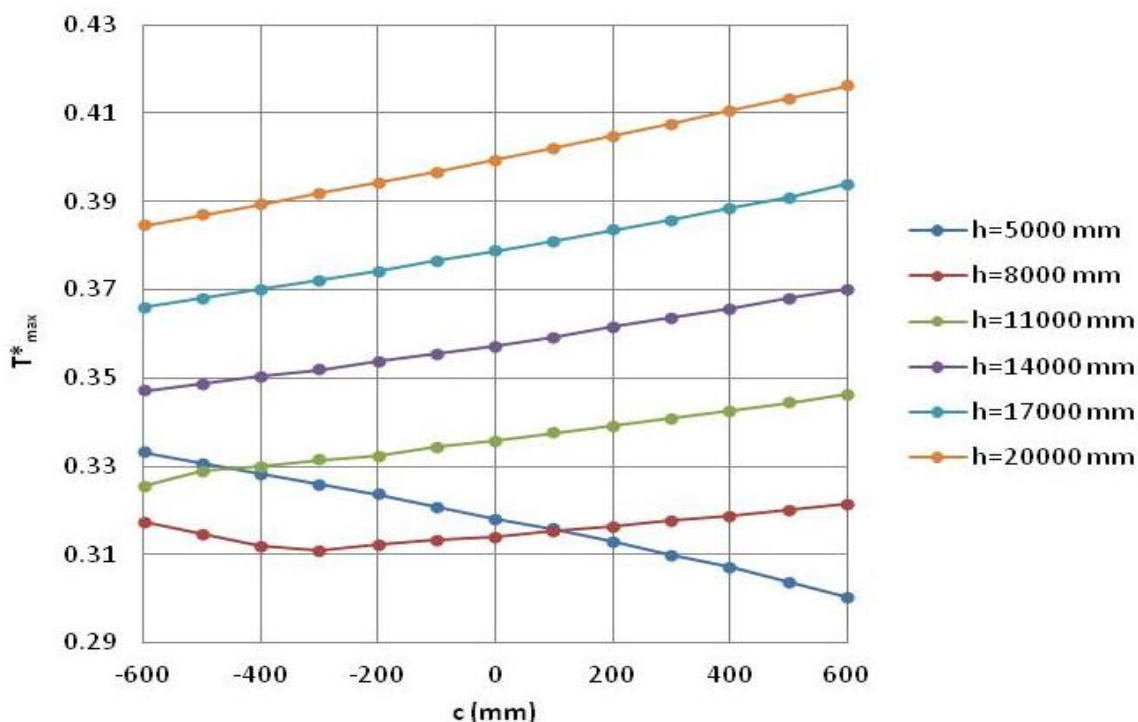


Gráfica 5.16: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida (A_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 1



Gráfica 5.17: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 1

Por último, vamos a ver qué valores máximos de tensión en los cables tendremos en el sistema. Para ello, nos fijamos en la **Gráfica 5.18**.



Gráfica 5.18: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 1

La tendencia de las curvas de tensión máxima es la que se muestra más claramente en la **Figura 5.148**. En dicha figura, también se puede ver la porción de gráfico (todo a modo de boceto) que se comprende entre el cruzamiento $c=-600\text{ mm}$ y $c=600\text{ mm}$, que es lo que forma la **Gráfica 5.18**. Esta tendencia, es aplicable al resto de casos de distribución de la carga en la parte de simulaciones en 2D.

Los cables que más trabajan y, por tanto, para los que se obtienen los valores máximos de tensión, son los cable 3 y 4. En los intervalos en los que las curvas antes mencionadas son decrecientes, la tensión máxima se alcanza en el cable 4, mientras que cuando las curvas crecen, la mayor tensión se alcanza en el cable 3.

En contraposición, el cable que menos trabaja, y para el que se obtienen los valores más pequeños de tensión, es el cable 2. La tensión adimensional máxima en este cable, siempre está en torno a 0,25, siendo alrededor de 1,4 veces más pequeña que la tensión máxima total del sistema.

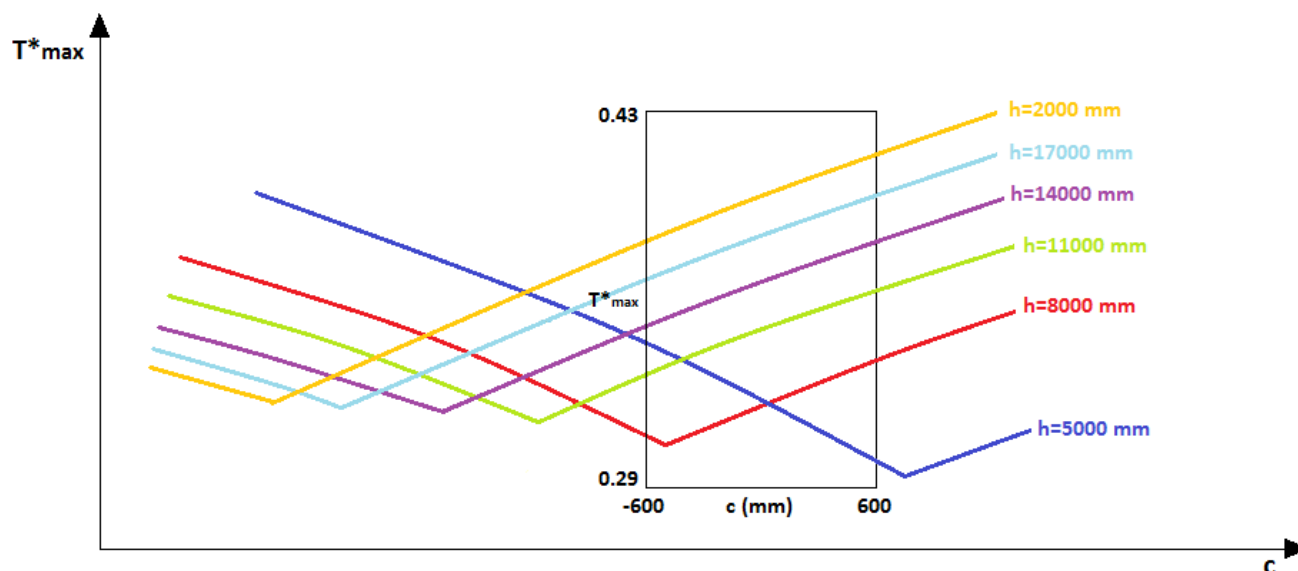


Figura 5.148: Tendencia de las curvas de tensión máxima

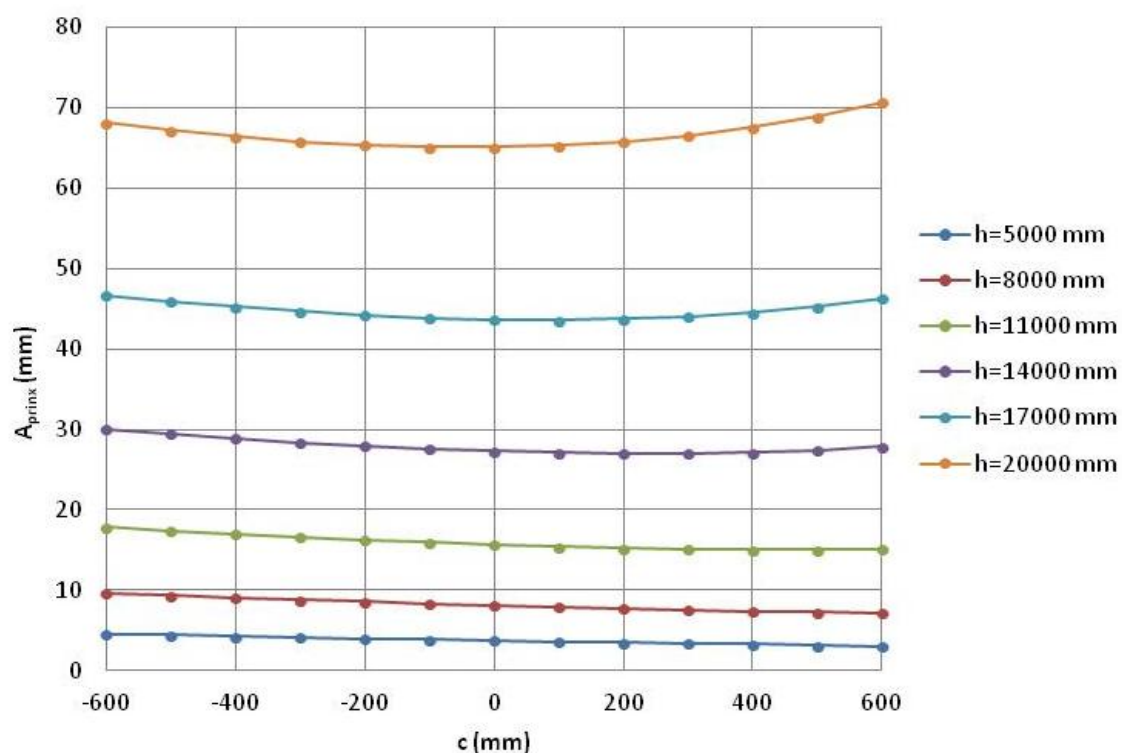
2.1.2 CASO 2: carga centrada con CM alto

Al estar ahora el contenedor cargado, obtendremos valores de giros, desplazamientos y periodos mayores que en caso 1. Del mismo modo que en el caso anterior, comenzamos analizando lo que sucede con el armónico principal.

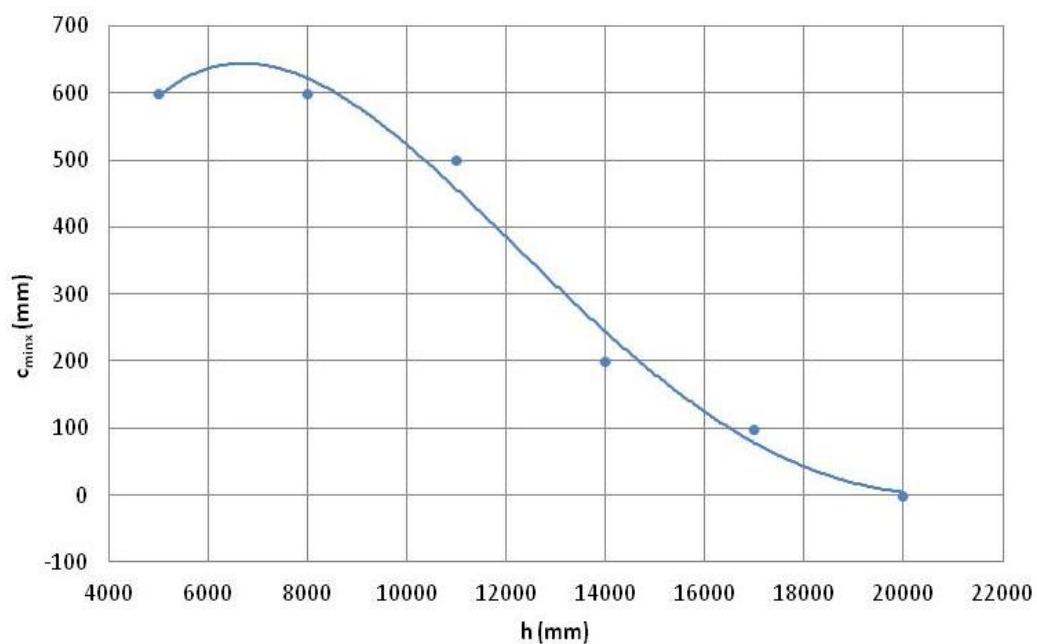
En la **Gráfica 5.19**, podemos observar las curvas de amplitud de dicho armónico en referencia a la posición relativa en x , en función de c y h . En ella, de nuevo nos encontramos con curvas en forma de bañera.

Representamos además, en la **Gráfica 5.20**, los mínimos de estas curvas en función de la altura de suspensión. Concluimos que, en este caso, para obtener un buen comportamiento de la carga suspendida en cuanto a posición relativa en x del armónico principal, sería conveniente utilizar cruzamientos en el intervalo entre 150 y 400 mm aproximadamente. Recordamos que tomamos como referencia las alturas de suspensión más importantes para nosotros: entre 11 y 17 m .

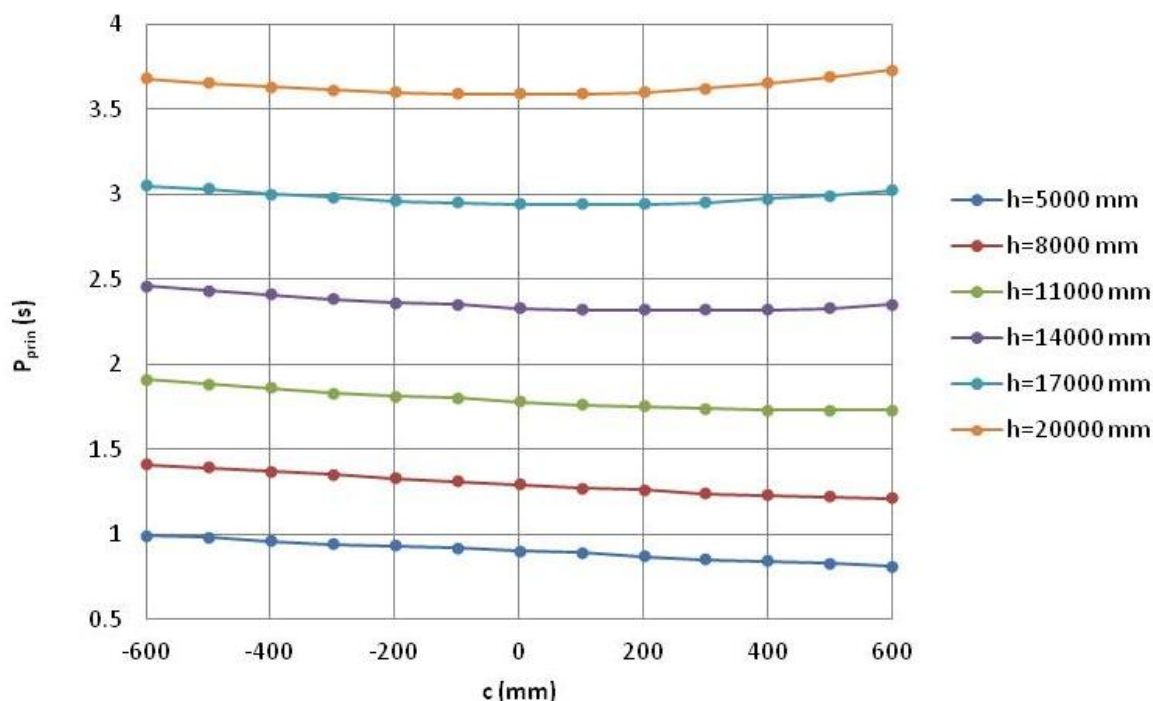
En la **Gráfica 5.21**, se muestra la gráfica correspondiente a periodos en de este mismo armónico, los cuales, como indicamos en el caso anterior, no nos pararemos a analizar.



Gráfica 5.19: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{pirnx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 2



Gráfica 5.20: Curva de cruzamiento para el mínimo valor de amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x de la carga suspendida (c_{minx}) en función de la altura de suspensión para el caso 2



Gráfica 5.21: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 2

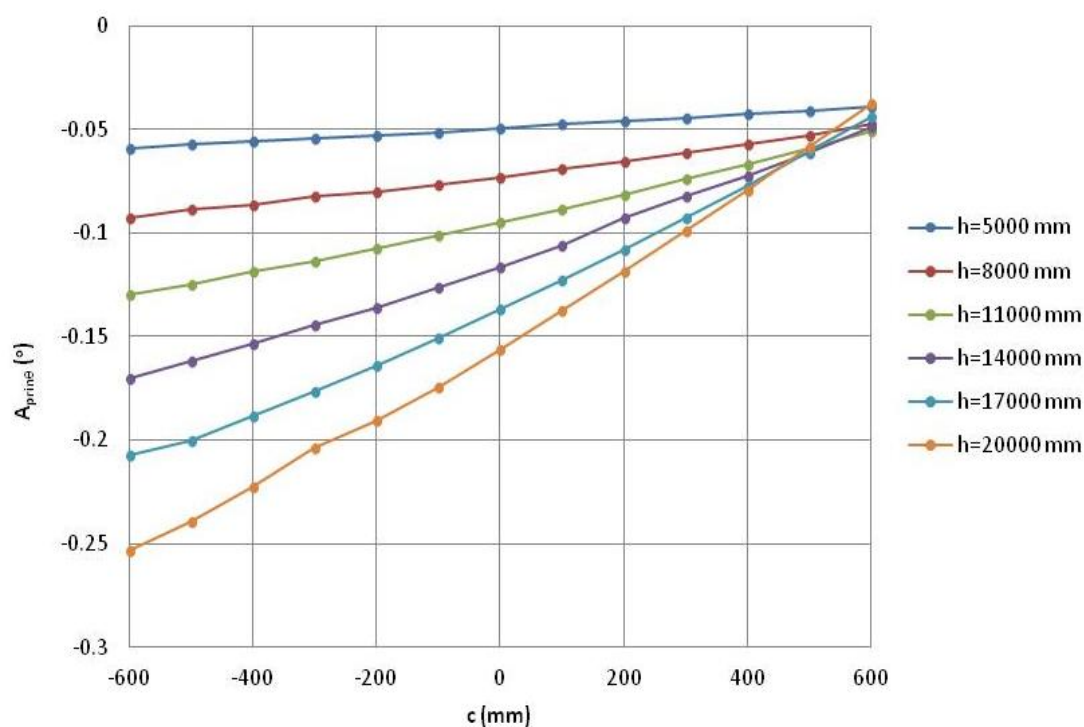
Vemos ahora la amplitud del armónico principal en referencia al giro, representada en la **Gráfica 5.22**.

Para este caso, cuanto mayor es el cruzamiento, mejor comportamiento tendremos en referencia al giro en el armónico principal.

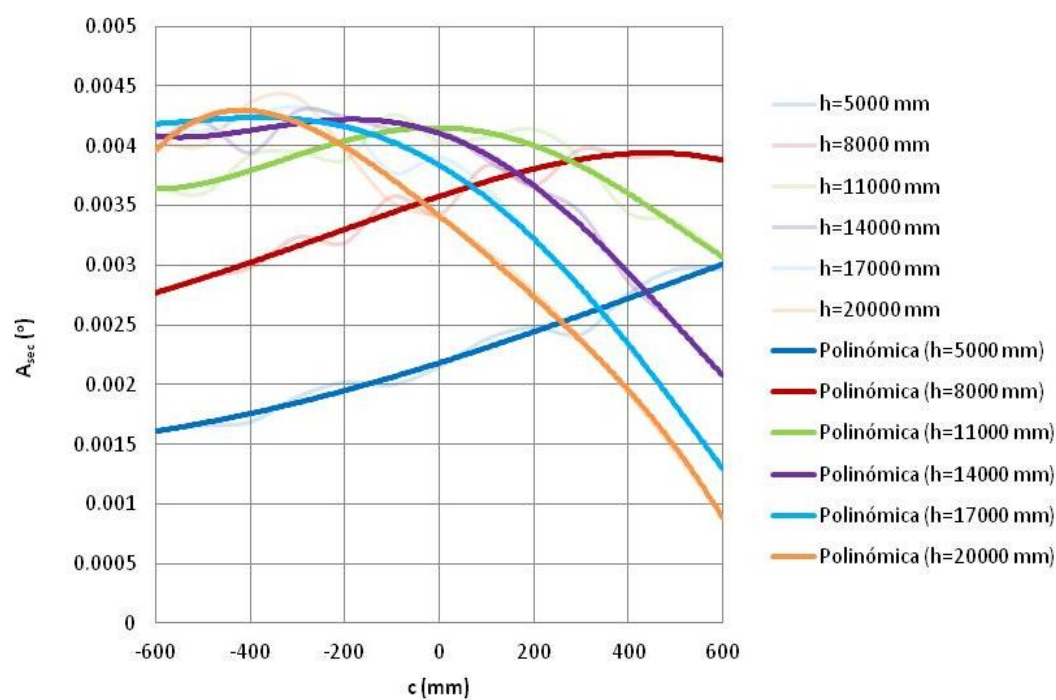
A continuación, vamos pasar a analizar el armónico secundario.

Comenzamos con la amplitud en referencia al giro, cuyo gráfico en función de c y h se puede observar en la **Gráfica 5.23**. Para esta disposición de carga, podemos decir que, para alturas entre 11000 y 17000 mm, sería conveniente usar valores grandes de cruzamiento si queremos tener un comportamiento lo mejor posible en este aspecto.

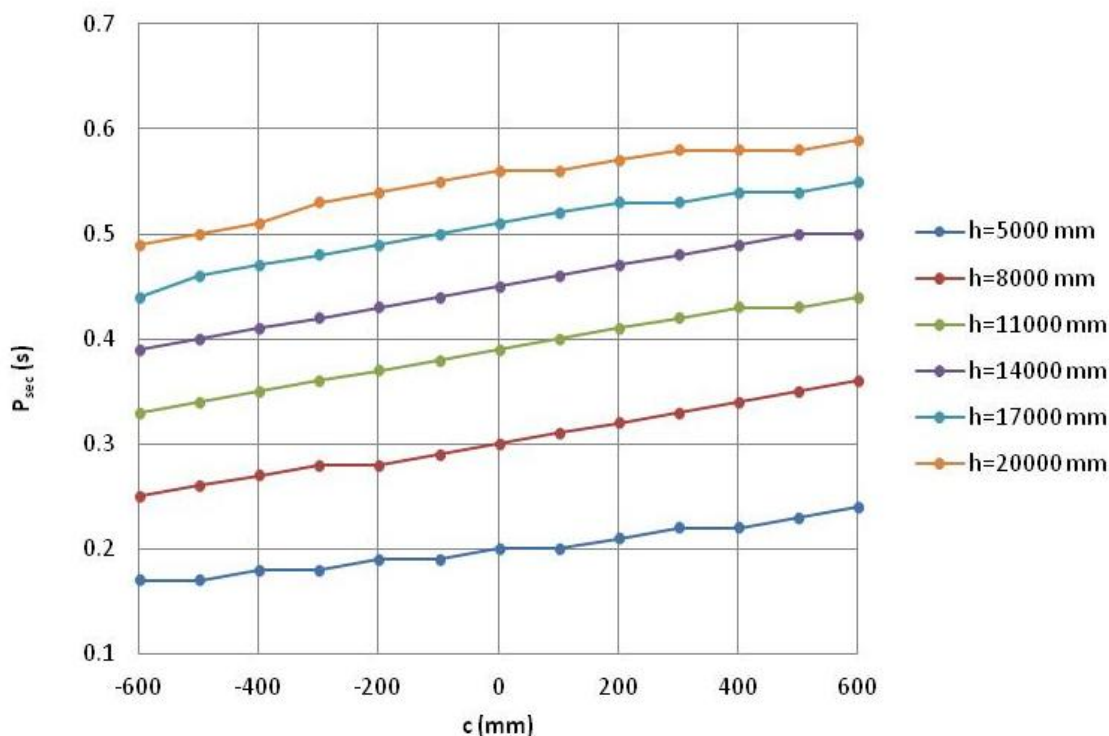
En la **Gráfica 5.24** podemos observar la gráfica de periodos del armónico secundario, los cuales no comentaremos.



Gráfica 5.22: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida (A_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 2



Gráfica 5.23: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida (A_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 2

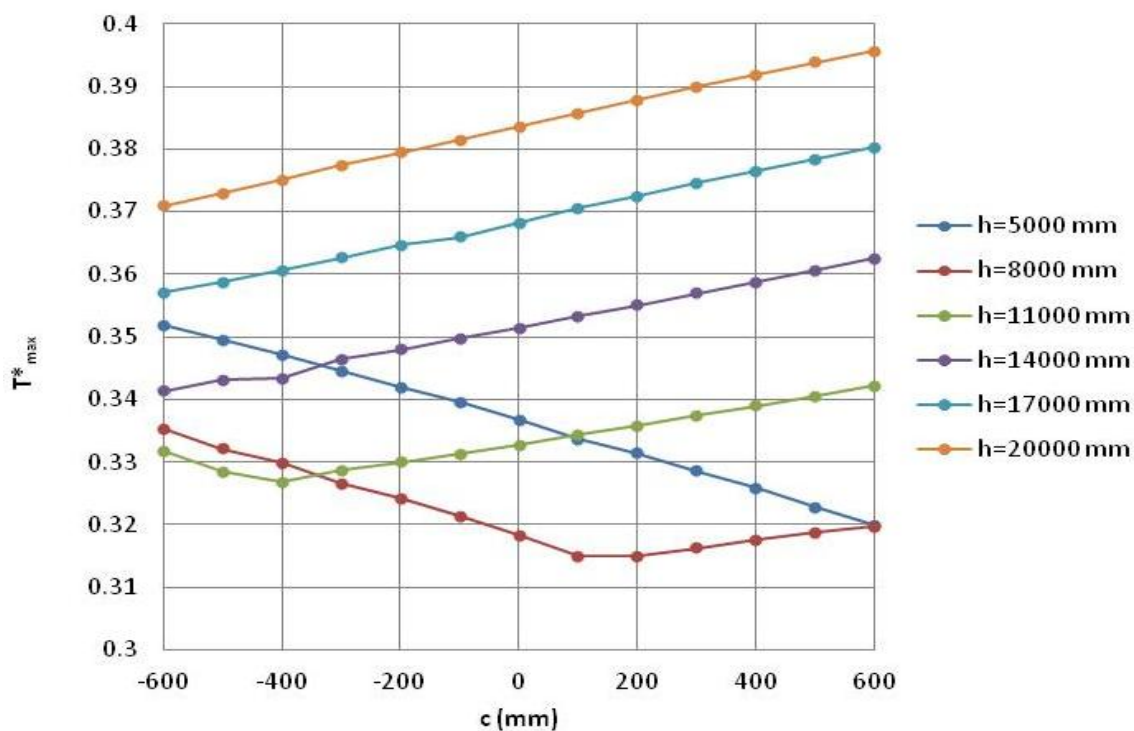


Gráfica 5.24: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 2

Pasamos ahora a representar los valores máximos de tensión en los cables del sistema, para lo que nos apoyaremos en las curvas que podemos apreciar en la **Gráfica 5.25**. La tendencia de dichas curvas es la misma que en el caso anterior.

Como en el caso 1, cuando las curvas se encuentran en el intervalo descendente, el cable en el que se obtienen mayores tensiones es el 4, mientras que cuando se encuentran en el tramo ascendente el cable con la máxima tensión es el 3.

De igual manera, el cable que menos trabaja es el 2, obteniéndose una tensión adimensional máxima para este cable de alrededor de 0,25 en todas las simulaciones. Como en el caso anterior, dicha tensión es aproximadamente 1,4 veces menor que la tensión máxima adimensional total.

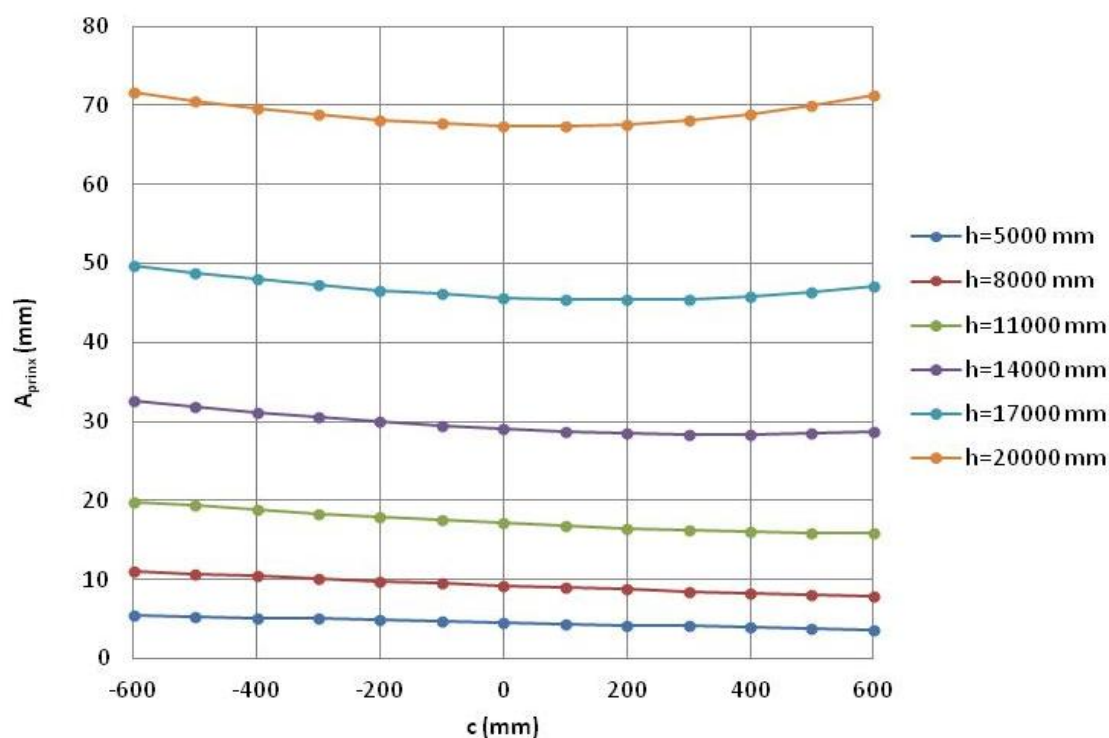


Gráfica 5.25: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 2

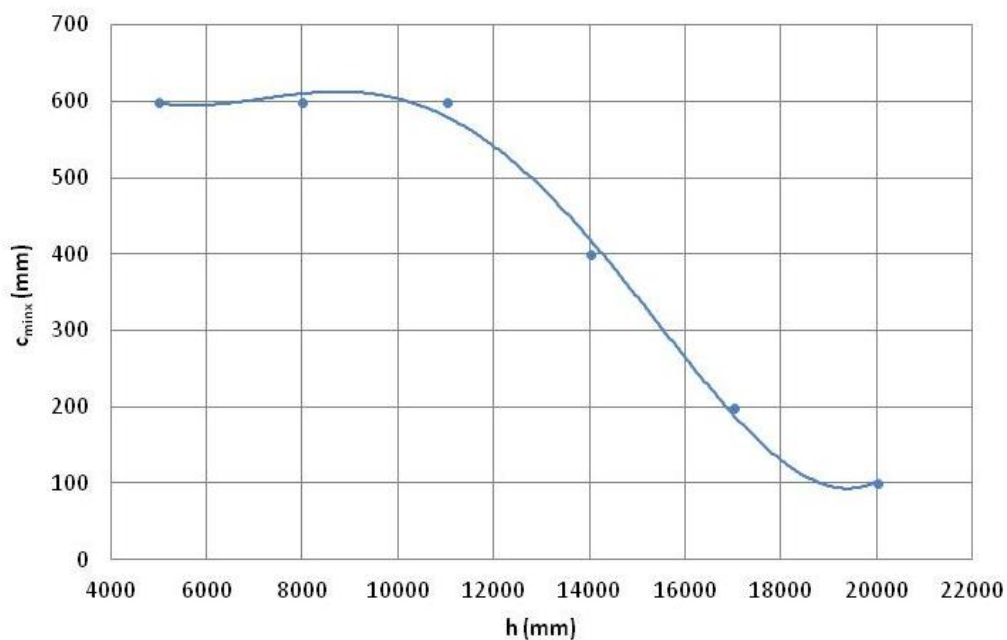
2.1.3 CASO 3: carga centrada con CM bajo

Empezamos con el análisis del armónico principal. Como era de esperar, el valor de las amplitudes referentes al desplazamiento relativo en x , son ligeramente superiores a las del caso anterior. Esto es debido a que ahora, el centro de masa de la carga se encuentra en una posición inferior. La gráfica de las citadas amplitudes se puede observar en la **Gráfica 5.26**.

Si representamos los valores de los mínimos de las curvas anteriores en función de la altura de suspensión (**Gráfica 5.27**), vemos que el desplazamiento hacia abajo que hemos realizado en el CM respecto al caso anterior, hace que el intervalo de cruzamiento más recomendable para un buen comportamiento de la carga suspendida en la variable en cuestión, varíe. En este caso, sería bueno usar un intervalo de cruzamiento entre 200 y 500 mm aproximadamente, frente al intervalo entre 150 y 400 mm del caso 2.

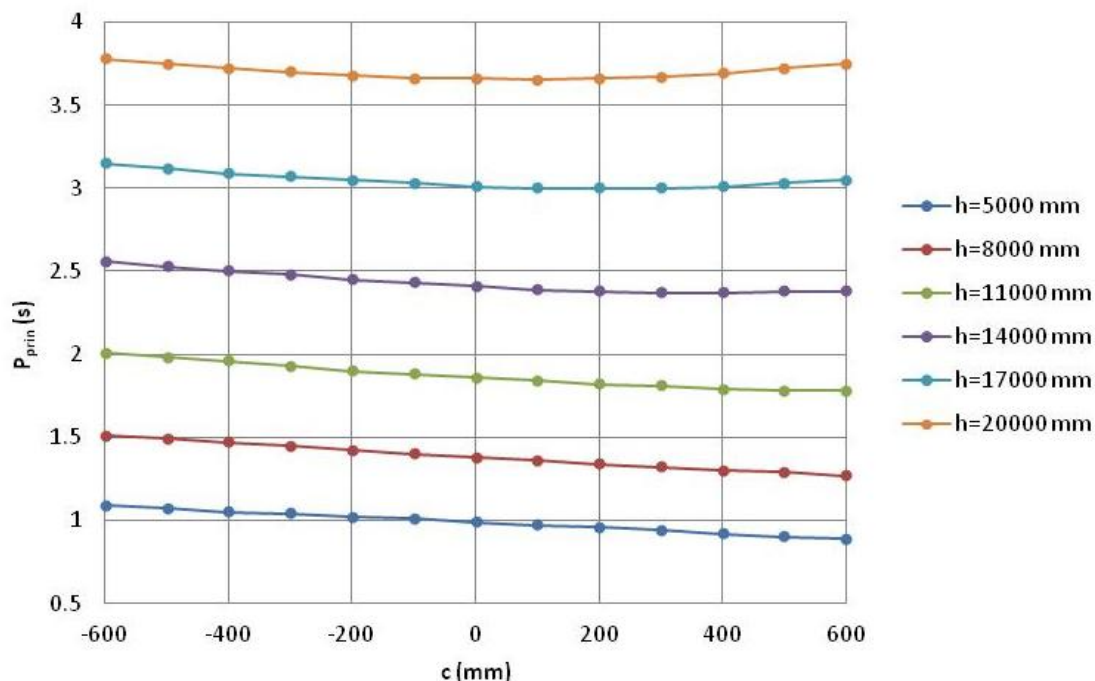


Gráfica 5.26: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{pirnx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 3



Gráfica 5.27: Curva de cruzamiento para el mínimo valor de amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x de la carga suspendida (c_{minx}) en función de la altura de suspensión para el caso 3

Podemos consultar la gráfica de periodos del armónico principal en la **Gráfica 5.28**. Al igual que ocurre con las amplitudes anteriores, los periodos del caso 3, son ligeramente superiores a los del caso 2, debido al desplazamiento hacia abajo que hemos realizado en el CM.

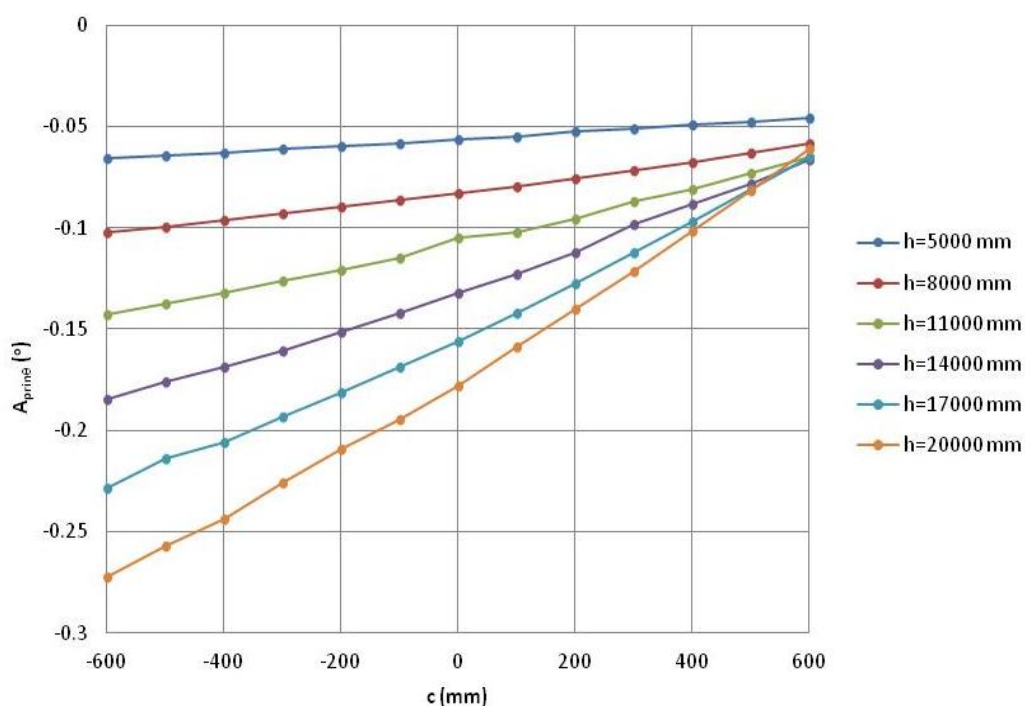


Gráfica 5.28: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 3

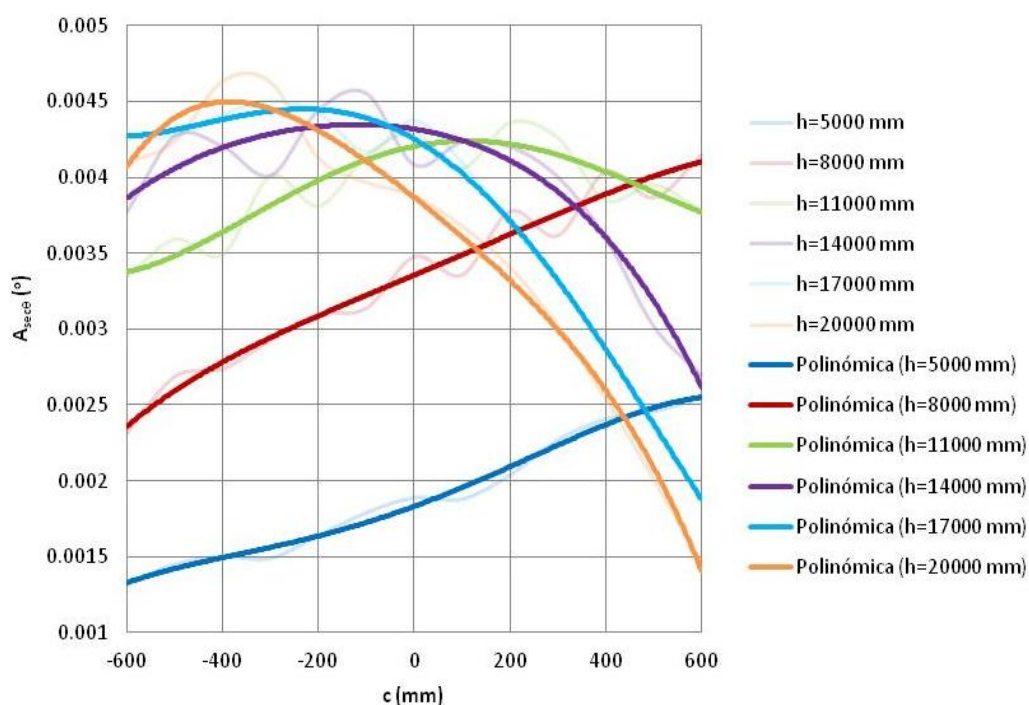
Pasamos ahora a mostrar la gráfica de amplitud del armónico principal en referencia al giro, que se puede ver en la **Gráfica 5.29**.

Las amplitudes del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida, también son mayores al desplazar ligeramente hacia abajo el CM. Igual que en el caso anterior, cuanto mayor sea el cruzamiento, mejor comportamiento tendremos en esta variable.

A continuación, analizamos lo que pasa en el armónico secundario. Como siempre, comenzamos con la amplitud de dicho armónico en referencia al giro, cuyas curvas están expuestas en la **Gráfica 5.30**. De nuevo aparecen las curvas en forma de campana y, de la misma manera que para el periodo y amplitud del armónico principal, desplazar el CM ligeramente hacia abajo supone un pequeño aumento en los valores de las mismas. Al igual que en el caso 2, si hablamos de las alturas principales de suspensión, cuanto mayor es el cruzamiento, mejor comportamiento tendremos en cuanto a la amplitud que estamos analizando.

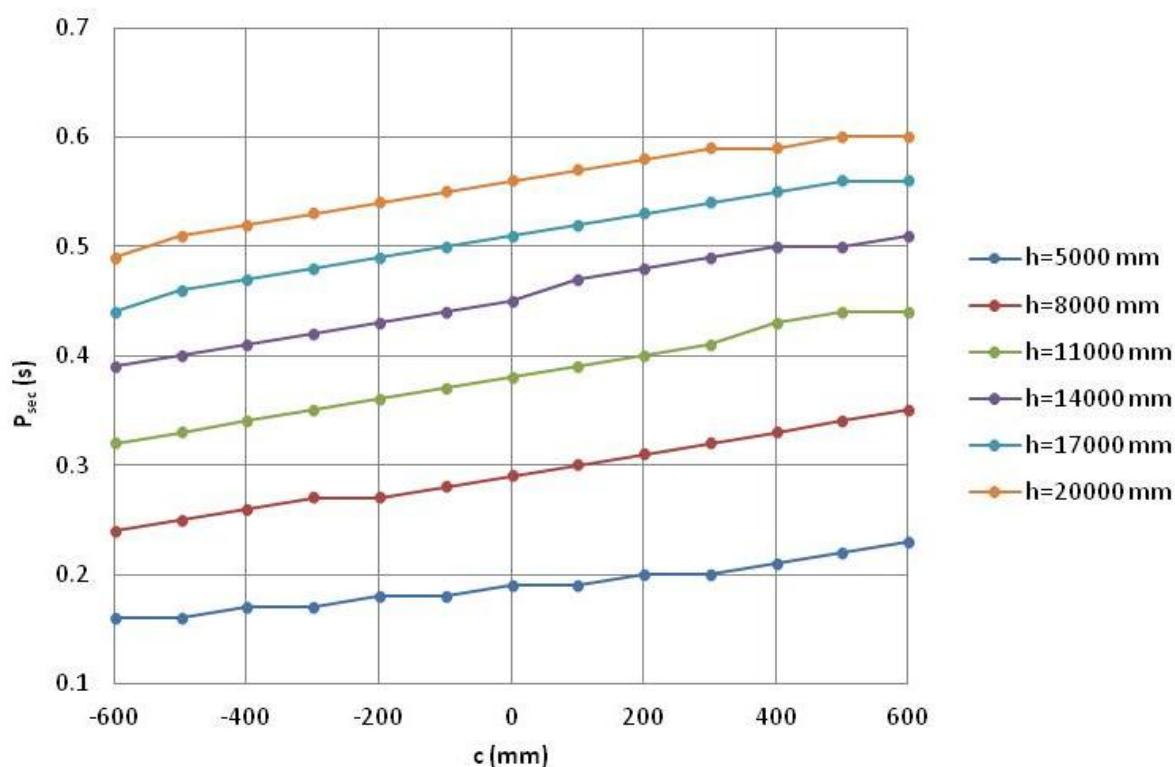


Gráfica 5.29: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida (A_{prime}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 3



Gráfica 5.30: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida (A_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 3

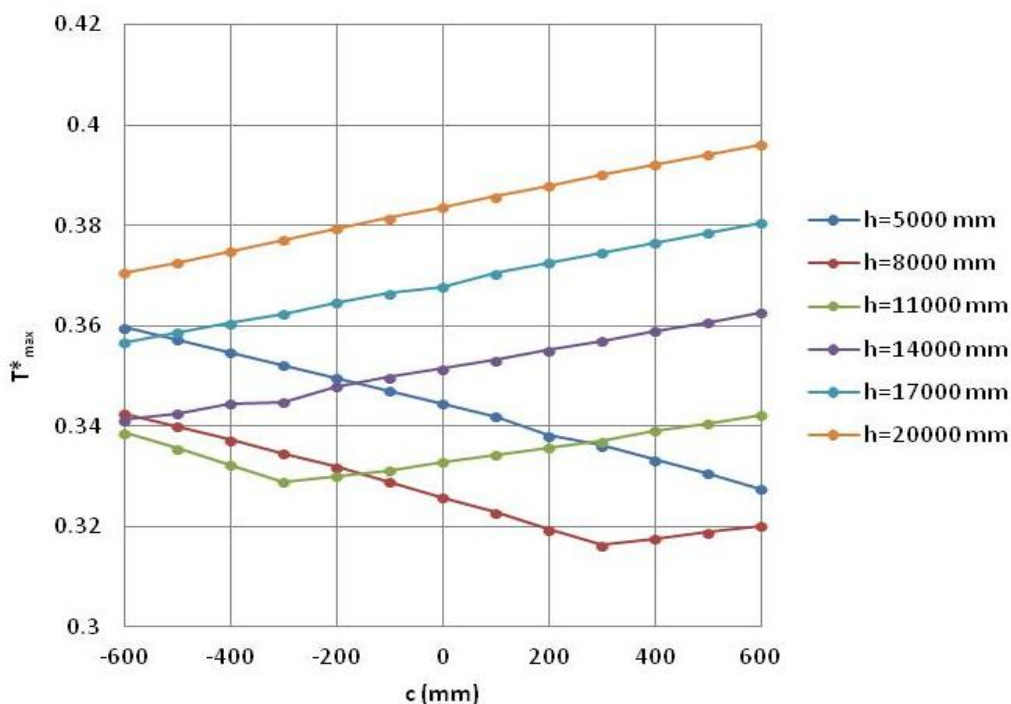
La gráfica de periodos del armónico secundario, se encuentra en la **Gráfica 5.31**. Las curvas que aparecen en dicha gráfica son prácticamente iguales a las del caso 2.



Gráfica 5.31: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 3

Por último hablaremos de las máximas tensiones en los cables del sistema, para lo cual tendremos en cuenta la **Gráfica 5.32**. De nuevo, los cables que más trabajan son el 3 y el 4. La tensión máxima adimensional total se obtiene en el cable 4 cuando las curvas descienden y en el cable 3 cuando dichas curvas tienen tendencia ascendente.

Al igual que en los casos anteriores, el cable que menos trabaja es el 2, obteniéndose una tensión máxima adimensional de aproximadamente 0,25 para todas las simulaciones. Dicha tensión es alrededor de 1,4 veces menor que la tensión máxima adimensional total.



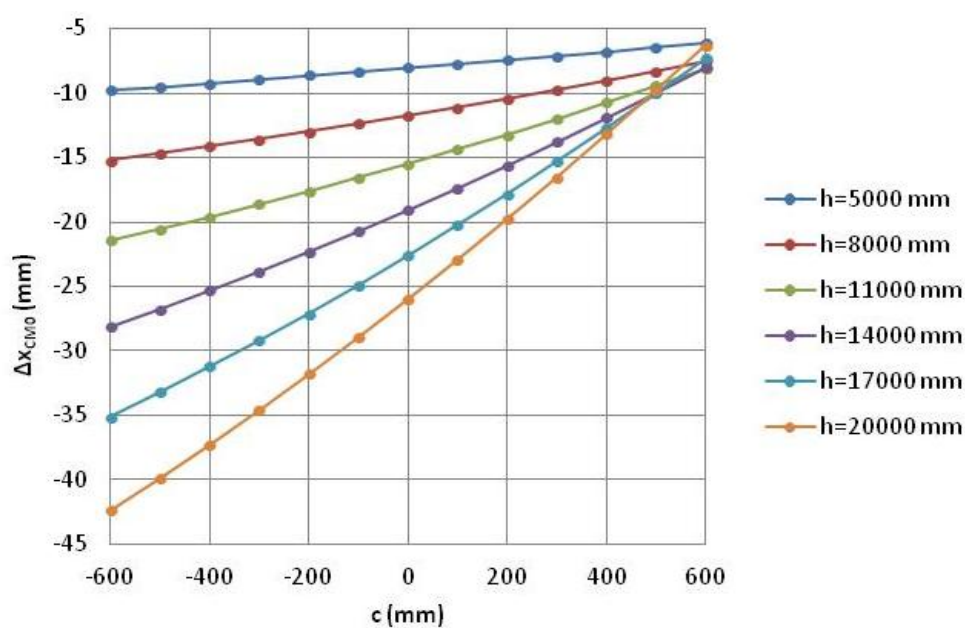
Gráfica 5.32: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 3

2.2 CASOS CON CARGA DESCENTRADA

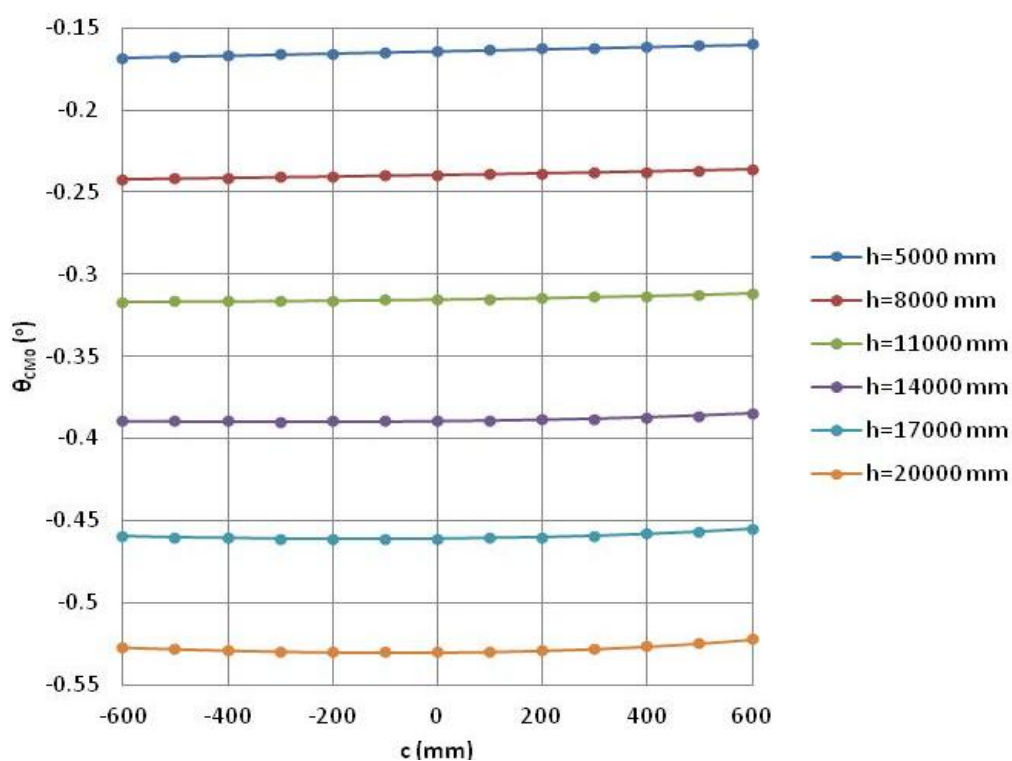
2.2.1 CASO 4: carga descentrada en +x con CM alto

En estos casos con carga descentrada, además de mostrar las gráficas de las variables vistas en los casos con carga centrada, analizaremos las gráficas que muestran la posición inicial de equilibrio (giros y posiciones relativas en x) en función de la altura de suspensión y del cruzamiento.

Comenzamos con estas últimas. La gráfica correspondiente la posición relativa en x y giro iniciales, se muestran en las **Gráficas 5.33 y 5.34** respectivamente. En ellas, se puede apreciar que cuanto mayor es el cruzamiento, menor es el desplazamiento inicial en x del CM de la carga suspendida. Sin embargo, las curvas de giro inicial de la carga suspendida varían muy poco con el cruzamiento.

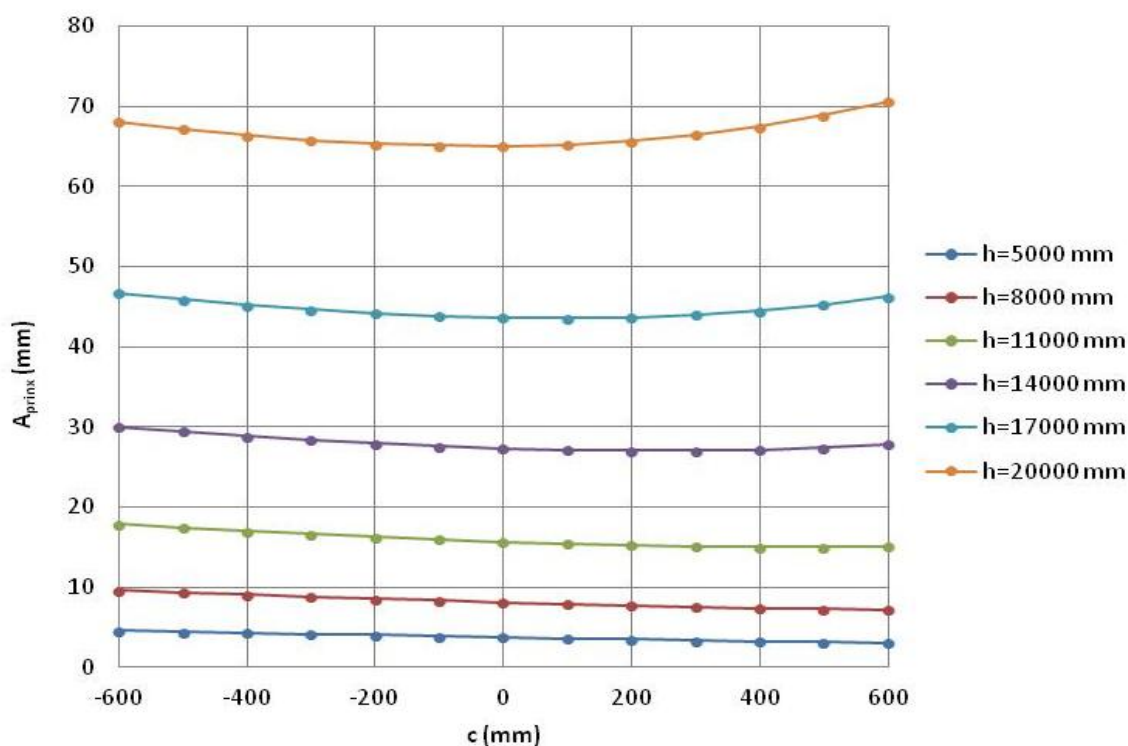


Gráfica 5.33: Desplazamiento inicial del centro de masa de la carga suspendida respecto a la posición con los cables sin tensionar (Δx_{CMO}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4



Gráfica 5.34: Giro inicial de la carga suspendida (θ_{CMO}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4

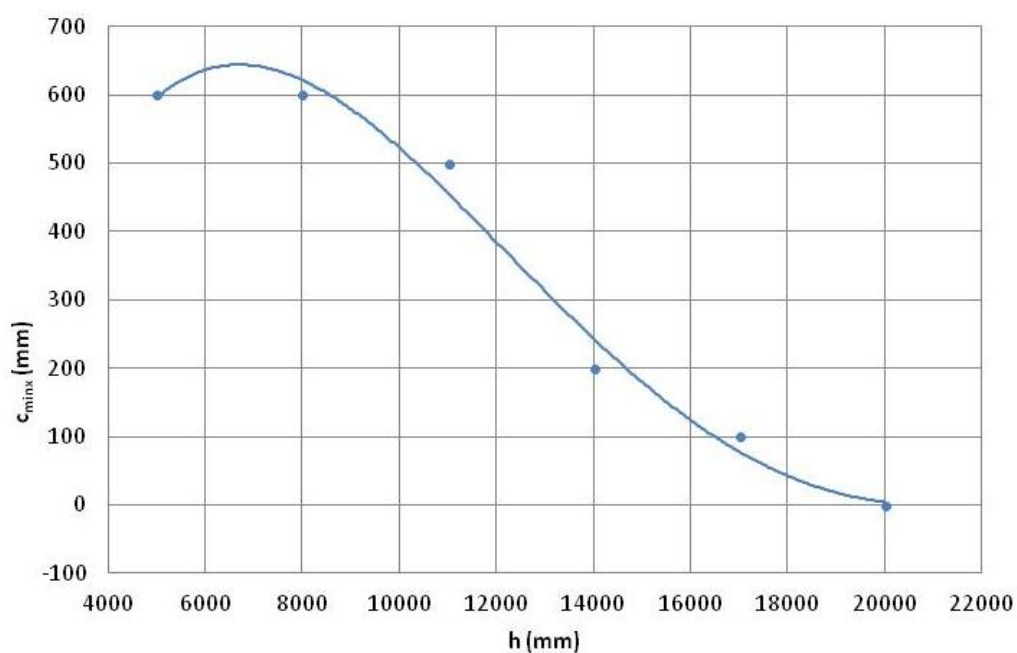
Dejamos la posición inicial de la carga suspendida, y pasamos a analizar el armónico principal. Como hemos venido haciendo a lo largo de este capítulo, comenzamos con la amplitud del citado armónico en referencia a la posición relativa en x , cuya gráfica se encuentra en la **Gráfica 5.35**.



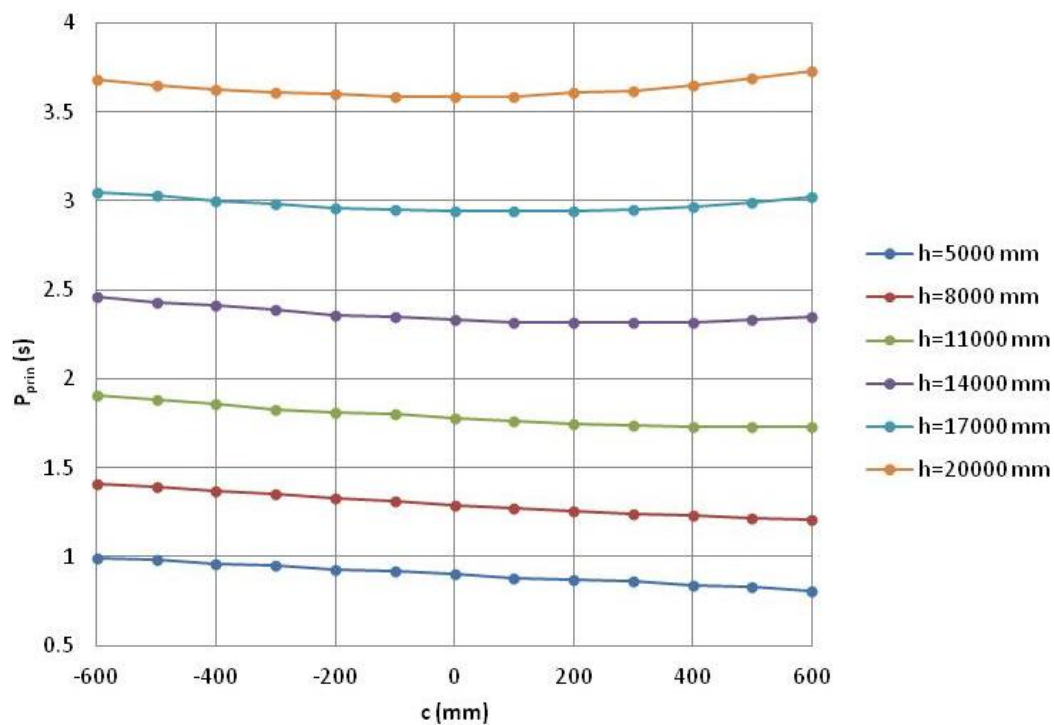
Gráfica 5.35: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{pirnx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4

Podemos comprobar que las curvas de posición relativa en x en función del cruzamiento, son prácticamente idénticas al caso homólogo con carga centrada (caso 2, también con CM alto). Además, con la **Gráfica 5.36**, podemos comprobar que, dichas curvas poseen sus mínimos para el mismo valor de cruzamiento que en el citado caso homólogo con carga centrada.

Las curvas de periodos de dicho armónico principal, que se exponen en la **Gráfica 5.37**, también son casi idénticas a las del caso 2.



Gráfica 5.36: Curva de cruzamiento para el mínimo valor de amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x de la carga suspendida (c_{minx}) en función de la altura de suspensión para el caso 4

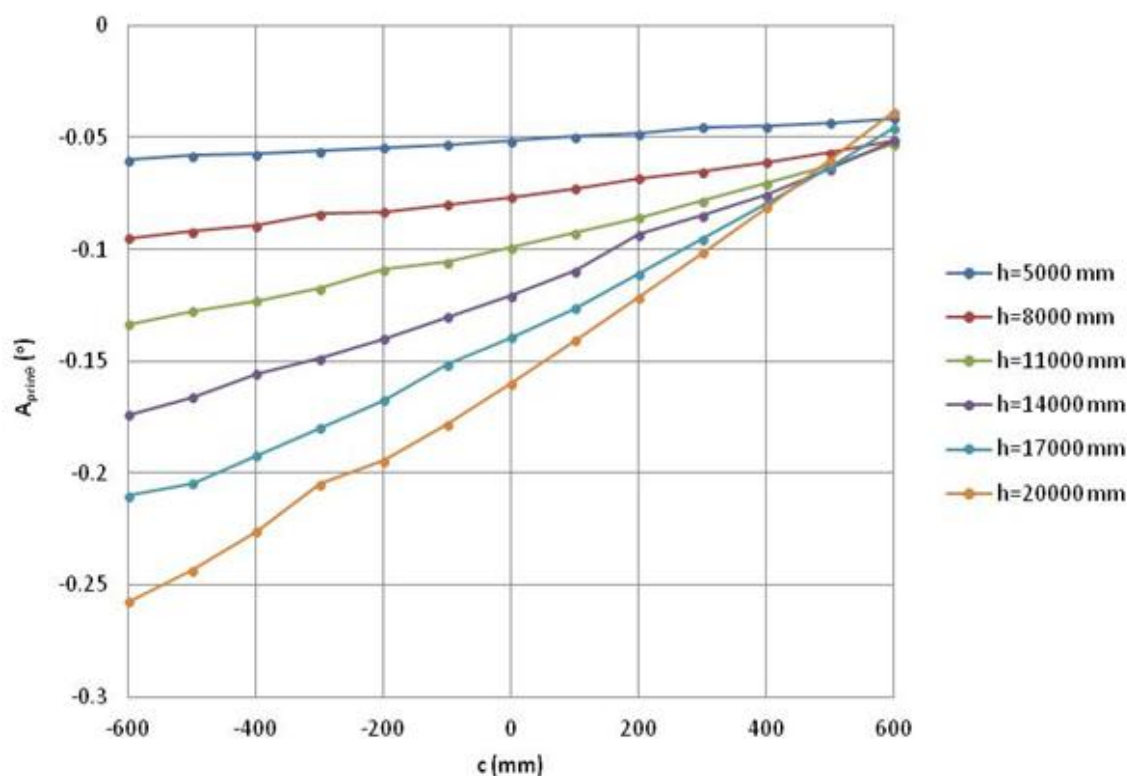


Gráfica 5.37: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4

Vamos a ver qué pasa con la amplitud del armónico principal en referencia al giro, cuyas curvas podemos ver en la **Gráfica 5.38**.

Al igual que con las gráficas anteriores, las curvas mostradas para la amplitud del armónico principal en referencia al giro del caso 4 son muy parecidas a las de su caso homólogo con carga centrada.

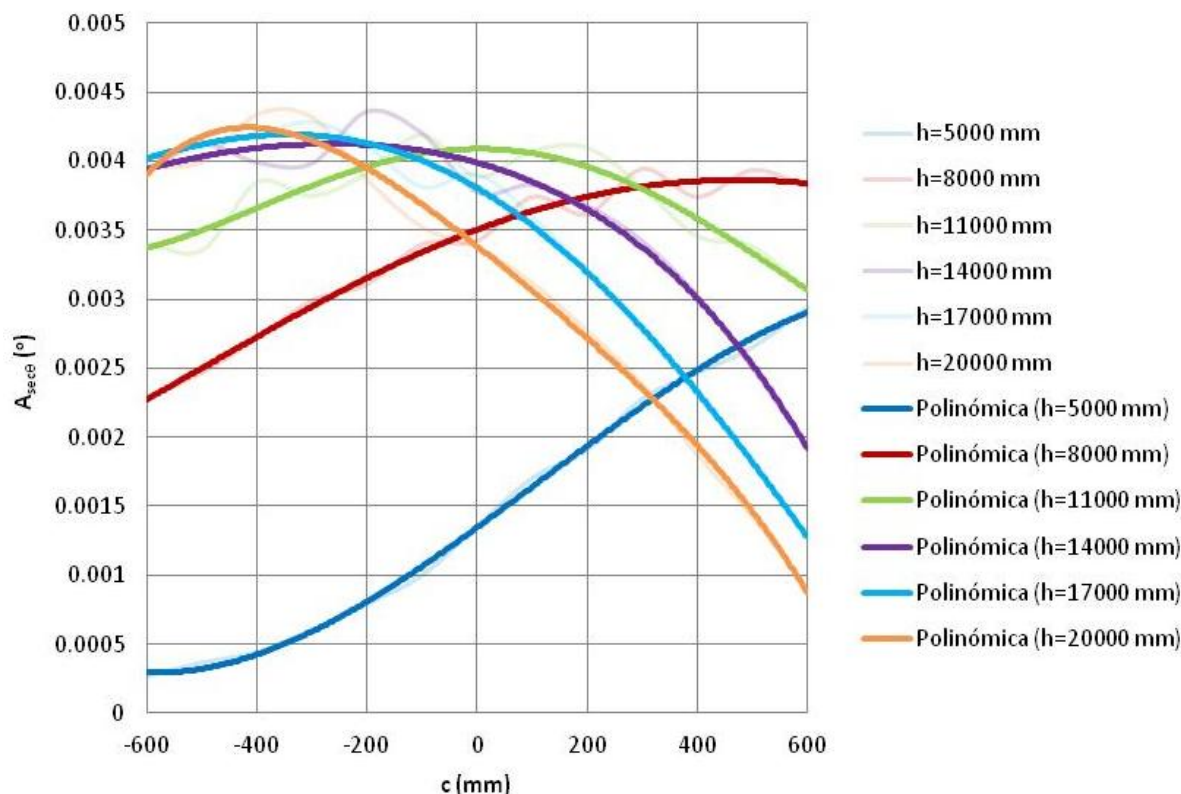
Con todo esto, podemos decir que **el descentramiento que hemos hecho de la carga para este caso, no tiene prácticamente efecto sobre el armónico principal**, ya que las curvas de periodo y amplitud del movimiento permanecen prácticamente inalterables al realizar dicho descentramiento.



Gráfica 5.38: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida (A_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4

Vamos ahora a ver si el armónico secundario tampoco se ve afectado por el descentramiento de la carga que se propone para este caso.

En primer lugar analizamos las curvas referentes a la amplitud del citado armónico, que se exponen en la **Gráfica 5.39**. La gráfica es muy parecida a la del caso 2, salvo que para los valores más pequeños de altura de suspensión y cruzamiento, la amplitud es sensiblemente menor en este caso. A medida que la altura de suspensión crece, dichas diferencias van desapareciendo.

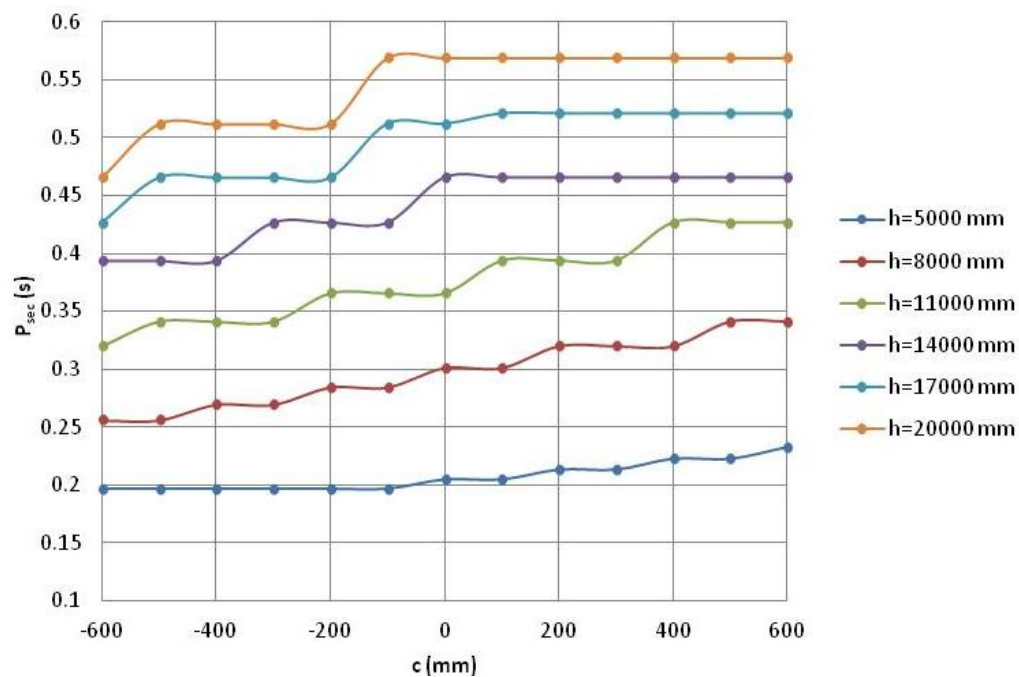


Gráfica 5.39: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida (A_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4

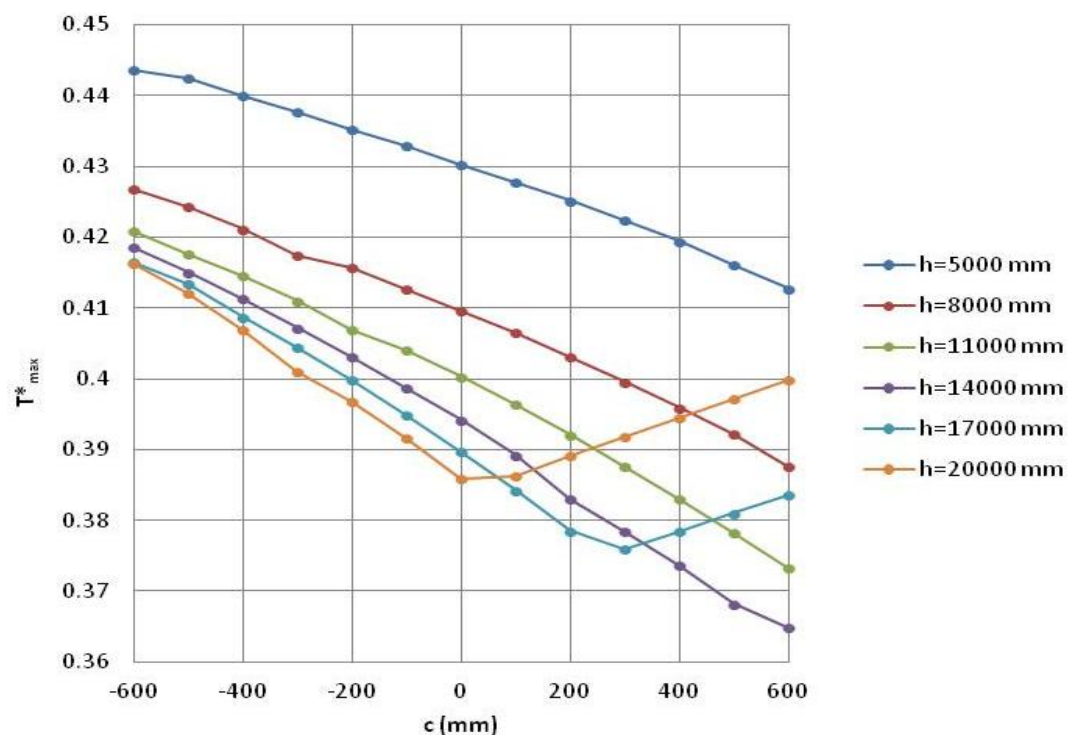
Si miramos ahora la gráfica en la que se muestran las curvas de periodos del armónico secundario (**Gráfica 5.40**), vemos que la forma de dichas curvas es algo distinta a las del caso 2. Sin embargo, la tendencia es más o menos la misma y los valores en los que se mueven son bastante parecidos.

Dicho esto, podemos afirmar que, al igual que ocurre con el armónico principal, **el descentramiento realizado en la carga para este caso no tiene mucha influencia sobre el segundo armónico**, si hablamos sobre todo de alturas de suspensión mayores a 8 m.

Pasamos a ver cuáles son las máximas tensiones que obtenemos en el sistema de cables. Para ello nos fijaremos en la **Gráfica 5.41**.



Gráfica 5.40: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4



Gráfica 5.41: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 4

Las curvas de tensión máxima adimensional total, sí son sensiblemente distintas a las del caso 2. La tensión máxima se sigue obteniendo en el cable 4 cuando las curvas descienden y en el cable 3 cuando ascienden. En esta ocasión, el cable que menos trabaja es el cable 1, con una tensión máxima adimensional de alrededor de 0,17 en todas la simulaciones realizadas. Dicha tensión adimensional máxima es alrededor de 2,3 veces menor que la tensión máxima adimensional total de cada simulación.

En definitiva, podríamos decir que el descentramiento realizado en la carga suspendida apenas tiene efectos sobre el armónico principal y el secundario. Donde sí se aprecian más cambios, es en las tensiones que se obtienen en los cables. Visto esto, a partir de ahora, para el resto de casos de carga descentrada, sólo realizaremos simulaciones para 3 alturas de suspensión distintas (5000, 11000 y 17000 mm), ya que los movimiento de la carga suspendida que esperamos encontrar, probablemente sean muy parecidos a sus casos homólogos con carga centrada.

2.2.2 CASO 5: carga descentrada en $-x$ con CM alto

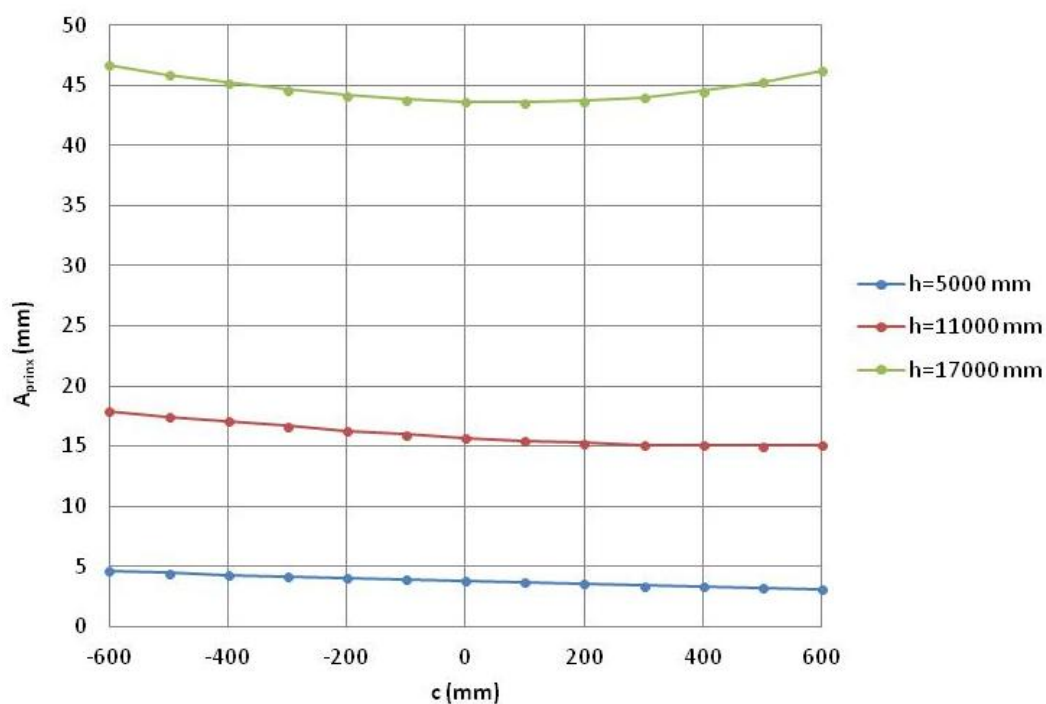
Como hemos apuntado anteriormente, sólo realizaremos simulaciones para tres alturas de suspensión distintas: 5000, 11000 y 17000 mm.

Comenzamos hablando del desplazamiento inicial en x (Δx_{CM0}) y giro (θ_{CM0}) iniciales de la carga suspendida.

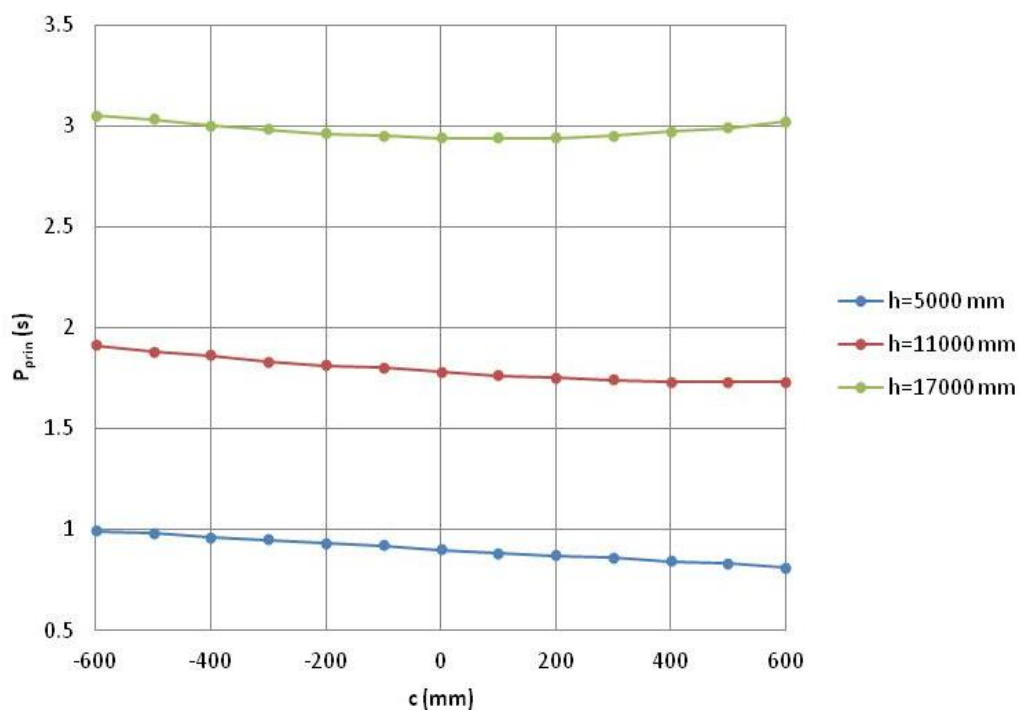
Dichos movimientos son de igual magnitud que en el caso anterior, pero con signo contrario, ya que ahora el descentramiento se realiza en el otro sentido del eje horizontal. Es por esto, que no mostraremos las gráficas correspondientes a estos movimientos en este caso. Nos remitimos, por tanto, a las gráficas correspondientes a los citados movimientos en el caso 4, teniendo en cuenta las condiciones aquí citadas.

Pasamos a ver ahora, las gráficas correspondientes al armónico principal. Las curvas de amplitud en referencia al desplazamiento relativo en x , se encuentran en la **Gráfica 5.42**, las de periodo en la **Gráfica 5.43** y las de amplitud en referencia al giro en la **Gráfica 5.44**.

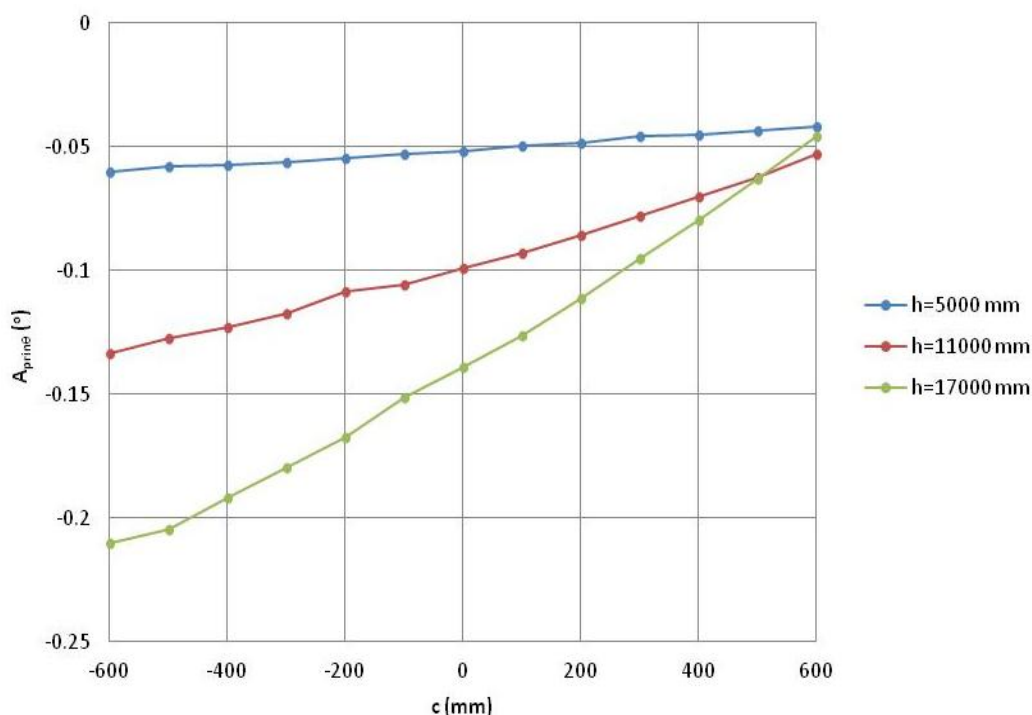
Observando las gráficas antes mencionadas, de nuevo, podemos decir que el descentramiento realizado en la carga suspendida no tiene efecto apreciable sobre el armónico principal, ya que obtenemos curvas bastante parecidas a las del caso homólogo con carga centrada (caso 2).



Gráfica 5.42: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{primx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 5



Gráfica 5.43: Periodo del armónico principal (P_{prim}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 5



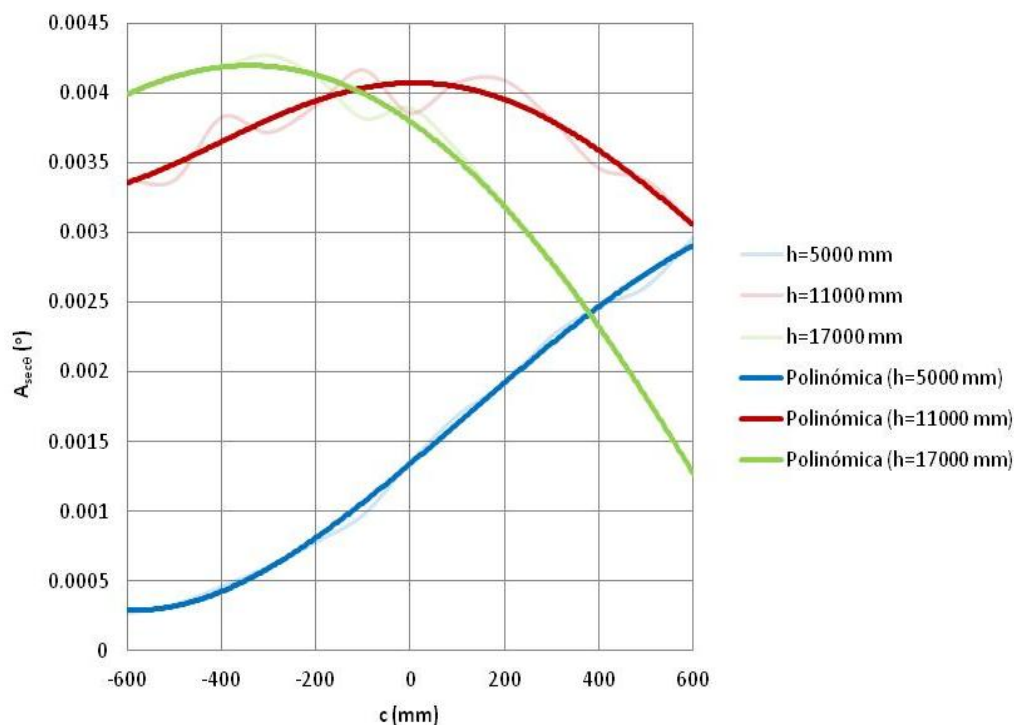
Gráfica 5.44: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida (A_{prime}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 5

Comprobamos ahora, si ocurre lo mismo con el armónico secundario. Para ello, nos apoyaremos en las curvas de amplitud de dicho armónico en referencia al giro, que se exponen en la **Gráfica 5.45**, así como en las curvas de periodo, las cuales se pueden ver en la **Gráfica 5.46**.

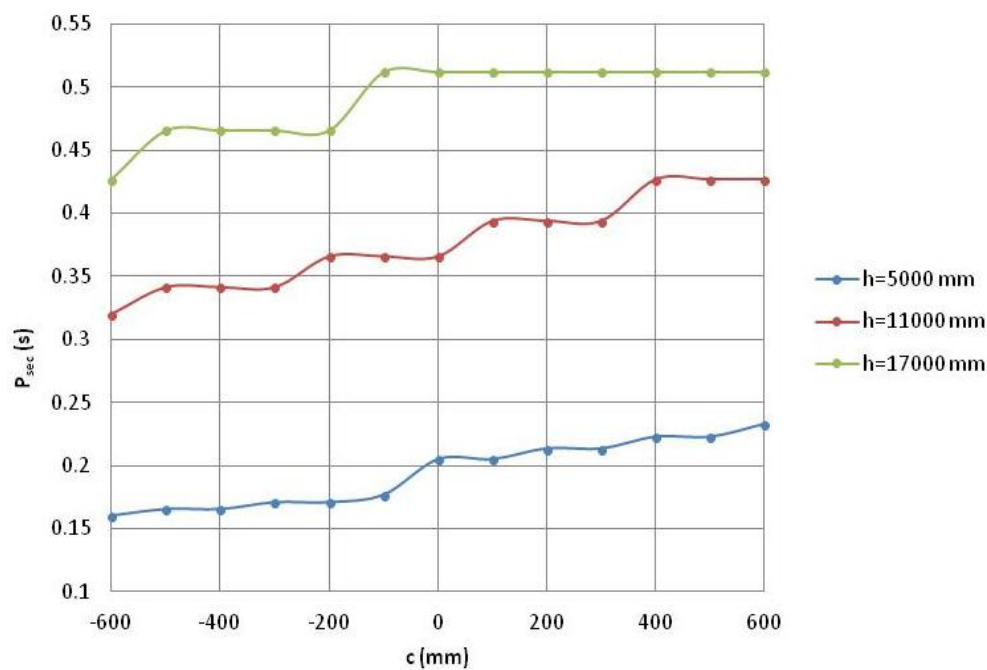
Analizando dichas gráficas, y comparándolas con las del caso homólogo con carga centrada, podemos decir, que el descentramiento realizado en la carga tampoco tiene prácticamente efecto en el armónico secundario.

Por último, pasamos a ver las curvas de tensión máxima en los cables del sistema, las cuales se encuentran en la **Gráfica 5.47**.

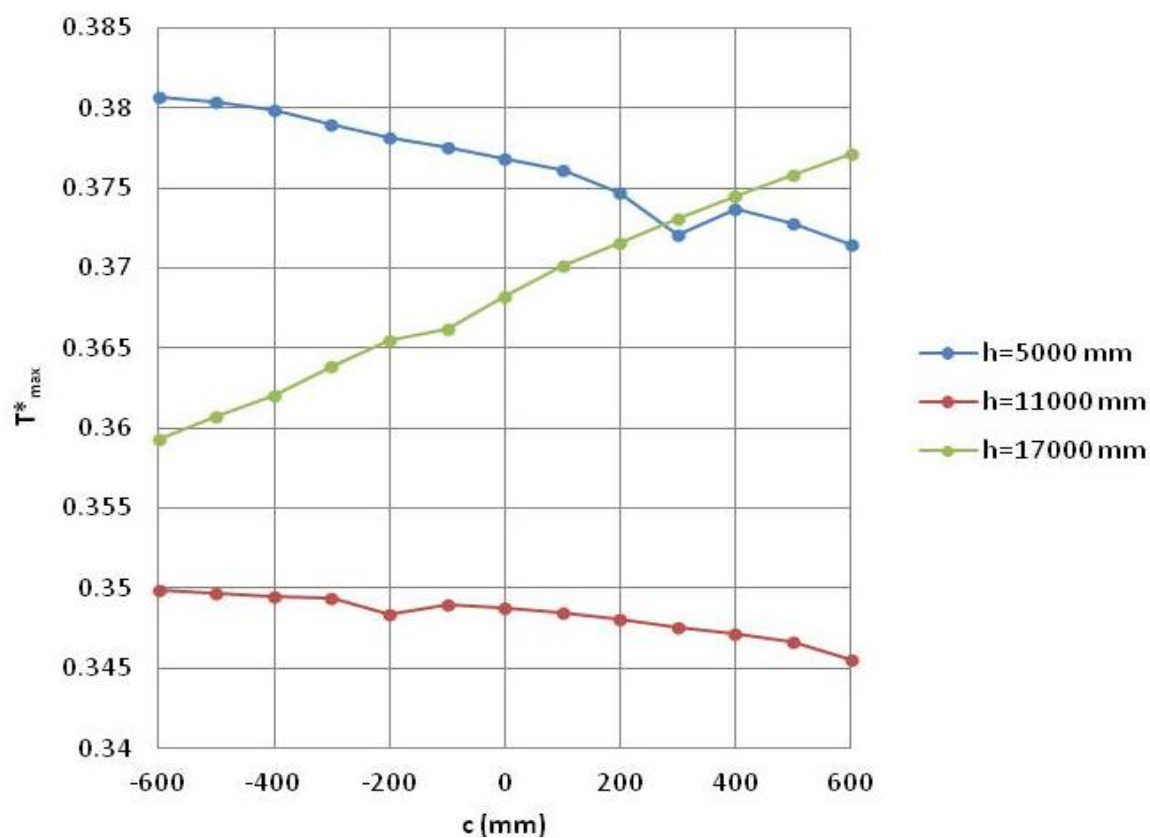
Se puede apreciar, que dichas curvas son bastante distintas a las obtenidas en los casos 2 y 4. En esta ocasión, las máximas tensiones se obtienen en el cable 1 (cuando las curvas son descendentes) y en el cable 3 (cuando son ascendentes). Los cables que menos trabajan son el cable 2 (para una altura de suspensión de 5000 mm y cruzamientos negativos) y el 4 (para el resto de simulaciones). Los valores máximos de tensión adimensional en estos cables, están en torno a 0,2, siendo alrededor de 1,7 veces más pequeños que el valor de tensión máxima adimensional en cada simulación.



Gráfica 5.45: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{sec\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 5



Gráfica 5.46: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 5



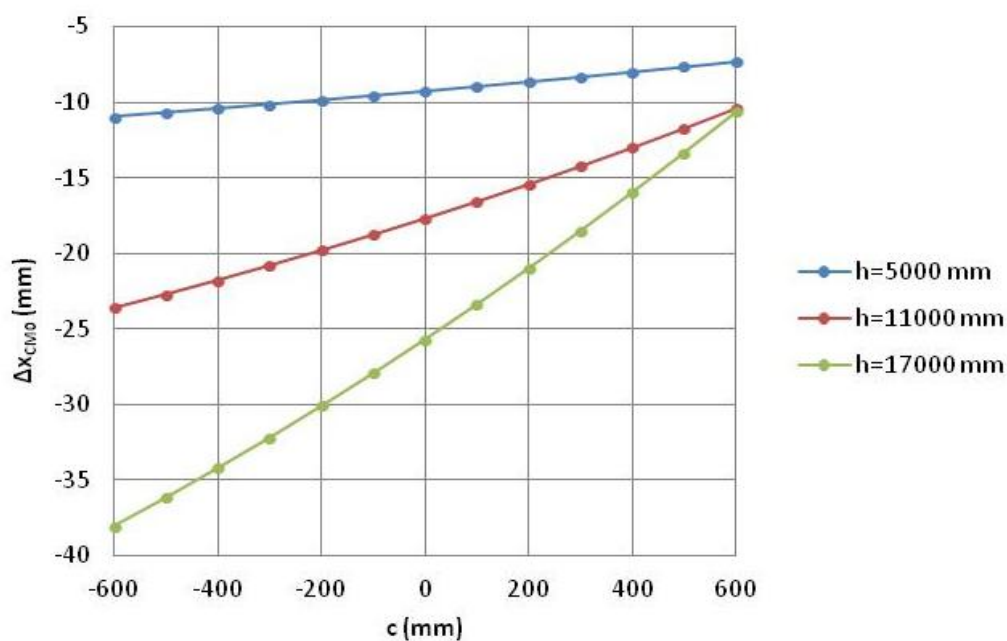
Gráfica 5.47: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 5

Podemos certificar de nuevo, que el descentramiento de la carga suspendida (con valor un 10% de la anchura del contenedor) no afecta prácticamente el movimiento de dicha carga. Sin embargo, sí cambia las tensiones que se obtienen en los cables.

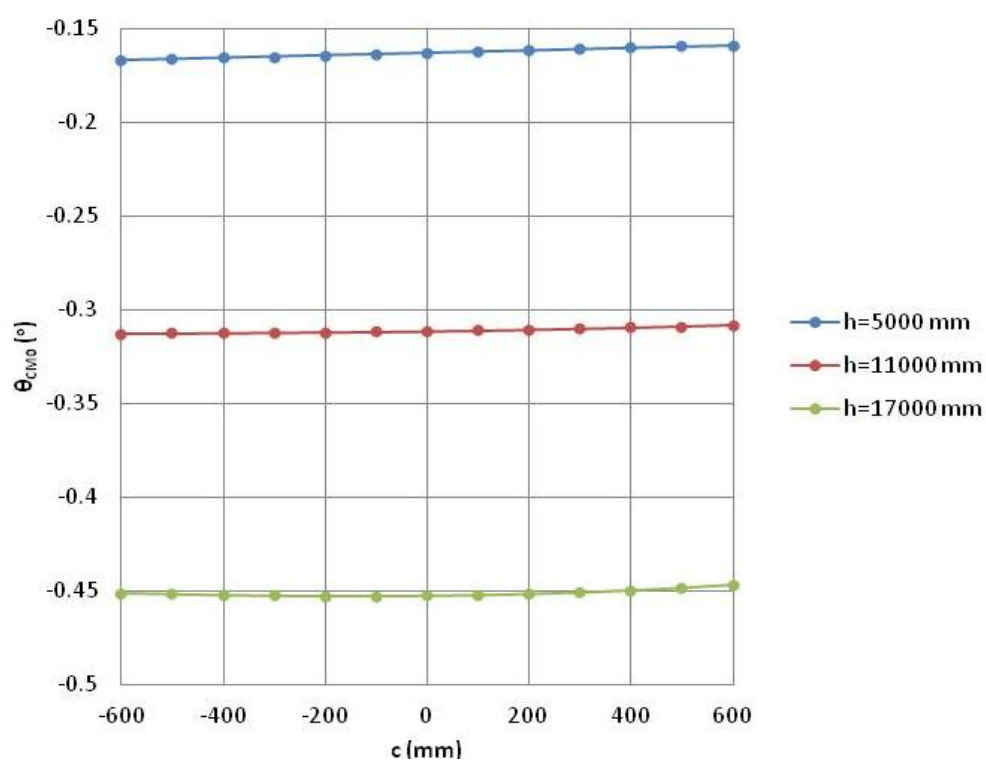
2.2.3 CASO 6: carga descentrada en +x con CM bajo

Primeramente, vamos con las curvas en las que se muestran el giro y desplazamiento en x iniciales de la carga suspendida, que se muestran en las **Gráficas 5.48 y 5.49** respectivamente.

Al tener el centro de masa más bajo, los desplazamiento iniciales en x son mayores que en el caso 4 (carga descentrada en +x con CM alto). Sin embargo, el efecto es contrario en el giro inicial: al bajar el centro de masa, obtenemos valores menores de giro inicial.

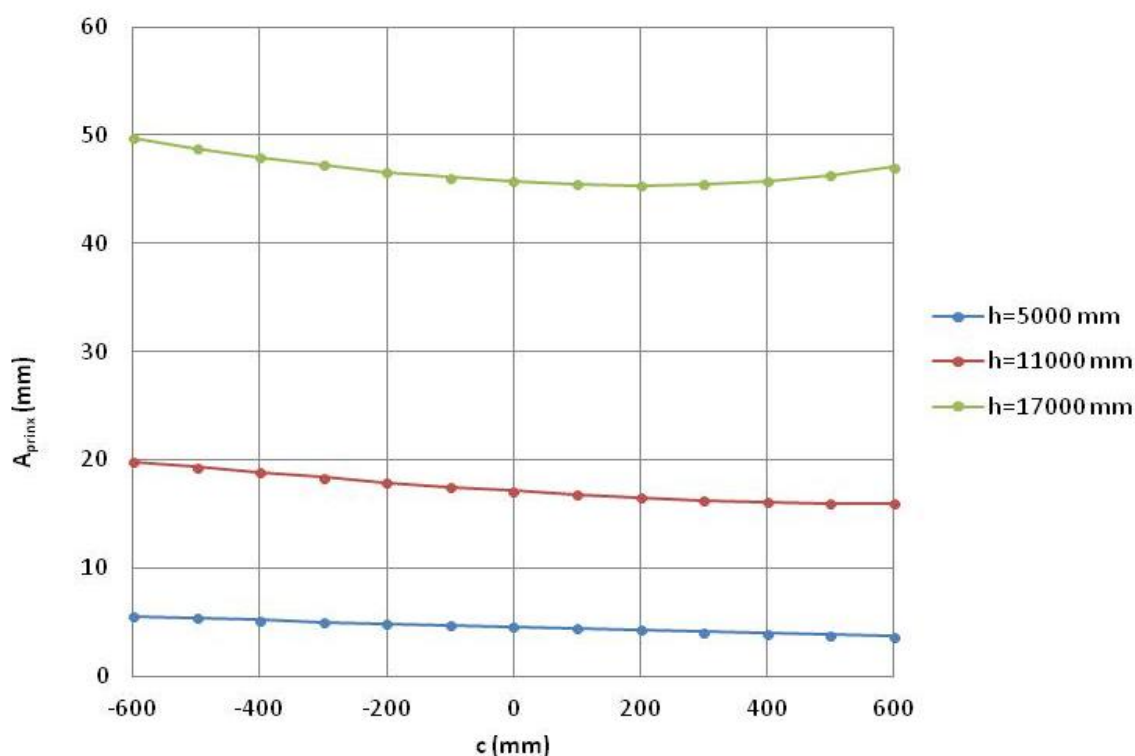


Gráfica 5.48: Desplazamiento inicial del centro de masa de la carga suspendida respecto a la posición con los cables sin tensionar (Δx_{CMO}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6



Gráfica 5.49: Giro inicial de la carga suspendida (θ_{CMO}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6

A continuación, vamos con las gráficas necesarias para el análisis del primer armónico. Comenzamos con la de amplitud en referencia al desplazamiento relativo en x , que se encuentra en la **Gráfica 5.50**.



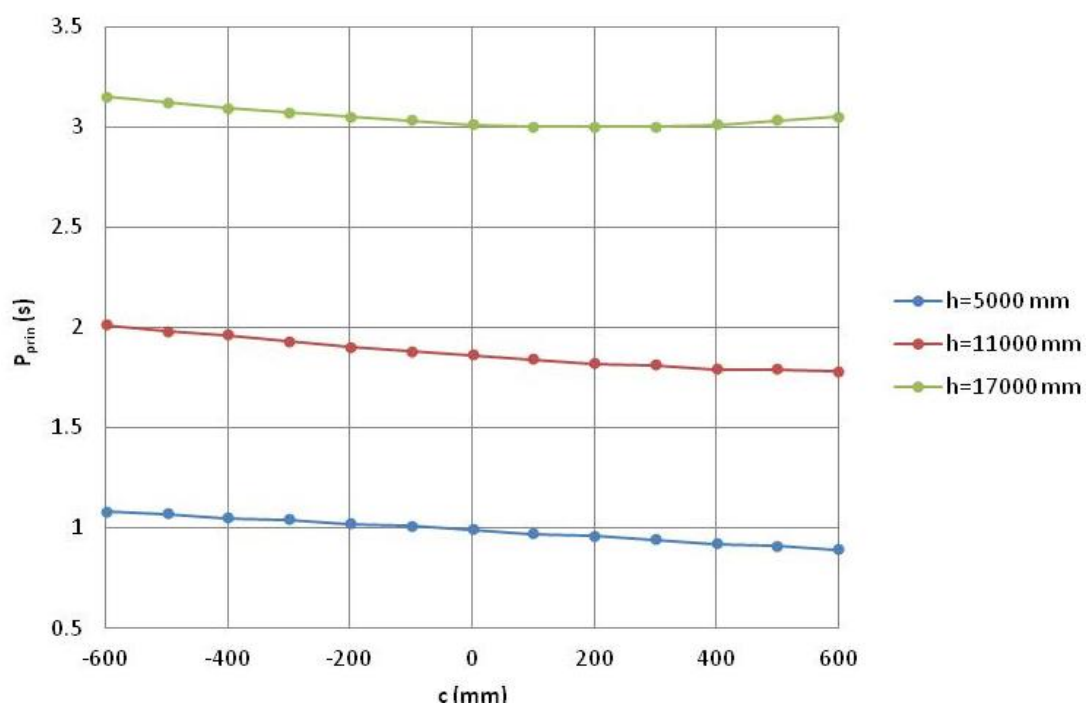
Gráfica 5.50: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{pirnx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6

Como hemos visto en casos anteriores, el descentramiento realizado en la carga no tiene prácticamente efecto en la amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (comparar con el caso 3).

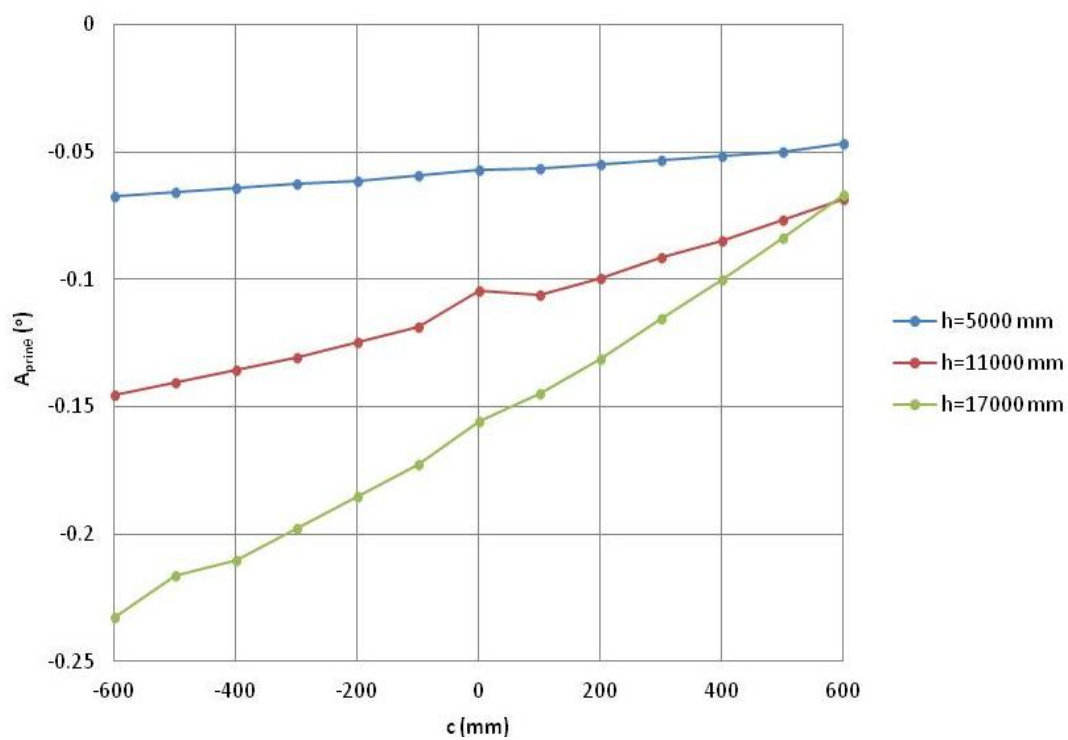
Es de esperar que con los periodos pase lo mismo. Para comprobarlo, nos vamos a las curvas que tenemos en la **Gráfica 5.51** y las comparamos con las del caso 3. Podemos ver que efectivamente los periodos son prácticamente idénticos.

Observamos ahora, las curvas de amplitud del armónico principal en referencia al giro que tenemos en la **Gráfica 5.52**, y vemos que son muy parecidas a las obtenidas en el caso 3.

Con todo esto, como en los casos con carga centrada analizados hasta ahora, el armónico principal no se ve afectado por el descentramiento realizado en la carga suspendida en este caso.

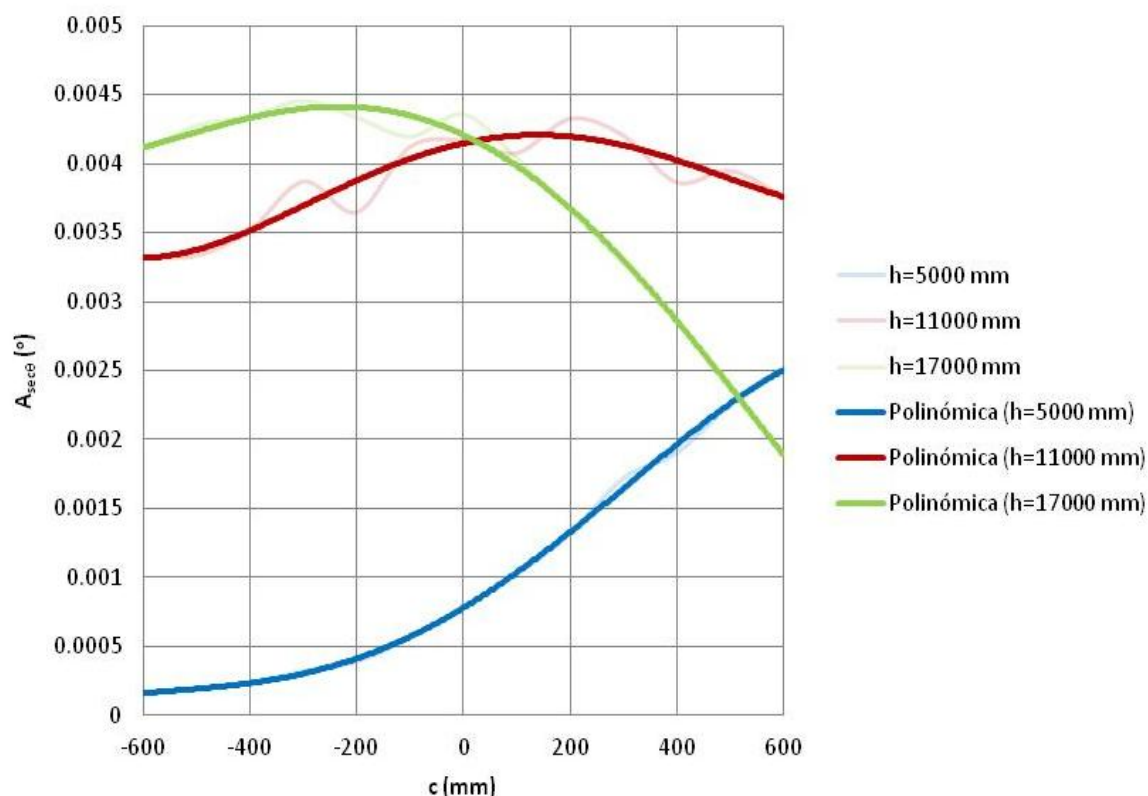


Gráfica 5.51: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6



Gráfica 5.52: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{prin\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6

Vemos ahora qué pasa con el armónico secundario. Comenzamos con las curvas de amplitud en referencia al giro (**Gráfica 5.53**).

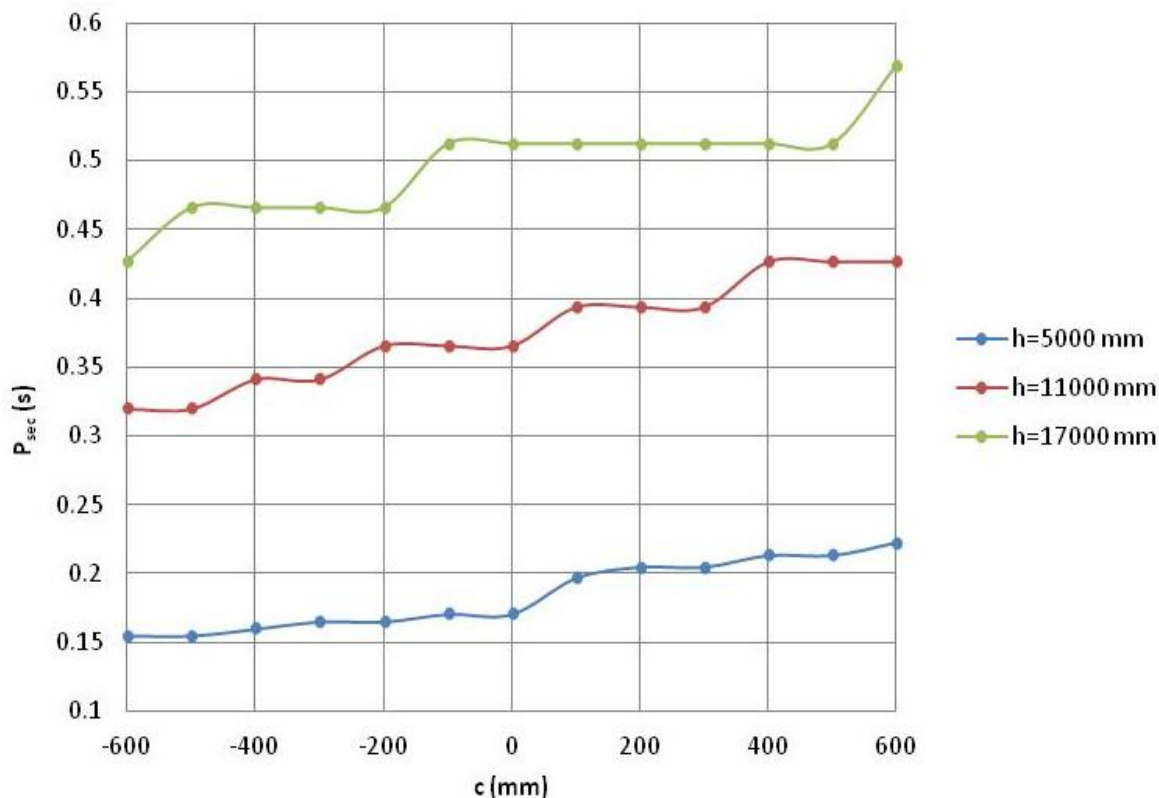


Gráfica 5.53: Amplitud del armónico secundario en referencia al giro de la carga suspendida (A_{secg}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6

Al igual que ocurre con los casos vistos anteriormente con carga descentrada, para valores pequeños de altura de suspensión y cruzamiento, obtenemos amplitudes del armónico secundario referentes al giro algo menores que con carga centrada. Sin embargo, a medida que la altura de suspensión va subiendo, las curvas con carga centrada y descentrada van igualándose.

Observamos a continuación la gráfica en la que se muestran las curvas de periodos del armónico secundario (**Gráfica 5.54**). En ella, podemos ver que la forma de las curvas no es la misma que para el caso homólogo con carga centrada (caso 3), pero la tendencia y los valores entre los que se mueven sí son los mismos.

De nuevo podemos concluir que el armónico secundario no se ve muy afectado por el descentramiento que hemos realizado en la carga suspendida.

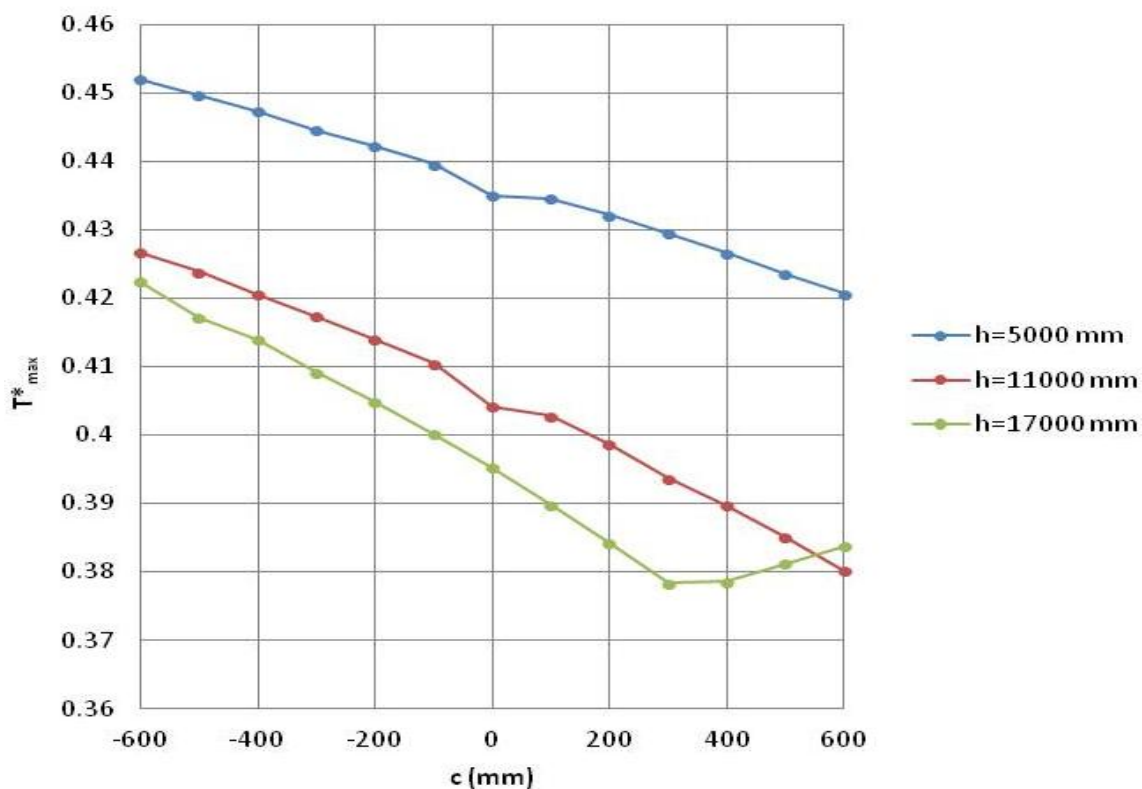


Gráfica 5.54: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6

Vemos, a continuación, las curvas de tensión máxima en el conjunto de cables del sistema, las cuales se encuentran en la **Gráfica 5.55**.

De igual forma que en los casos con carga descentrada vistos hasta ahora, las curvas de la gráfica antes mencionada, cambian sensiblemente con respecto a las del caso 3. La máxima tensión adimensional total se obtiene en los cables 3 (cuando la curva es ascendente) y 4 (cuando la curva es descendente). El cable que menos trabaja es el 1, con un valor de tensión máxima adimensional de 0,17 más o menos. Dicho valor es aproximadamente 2,3 veces menor que el valor de la tensión máxima adimensional total en cada simulación.

De nuevo podemos comprobar que el descentramiento de la carga, no tiene prácticamente efecto sobre el armónico principal y el secundario. Sin embargo, si lo tiene sobre los valores de tensiones en los cables, las cuales cambian de forma apreciable.

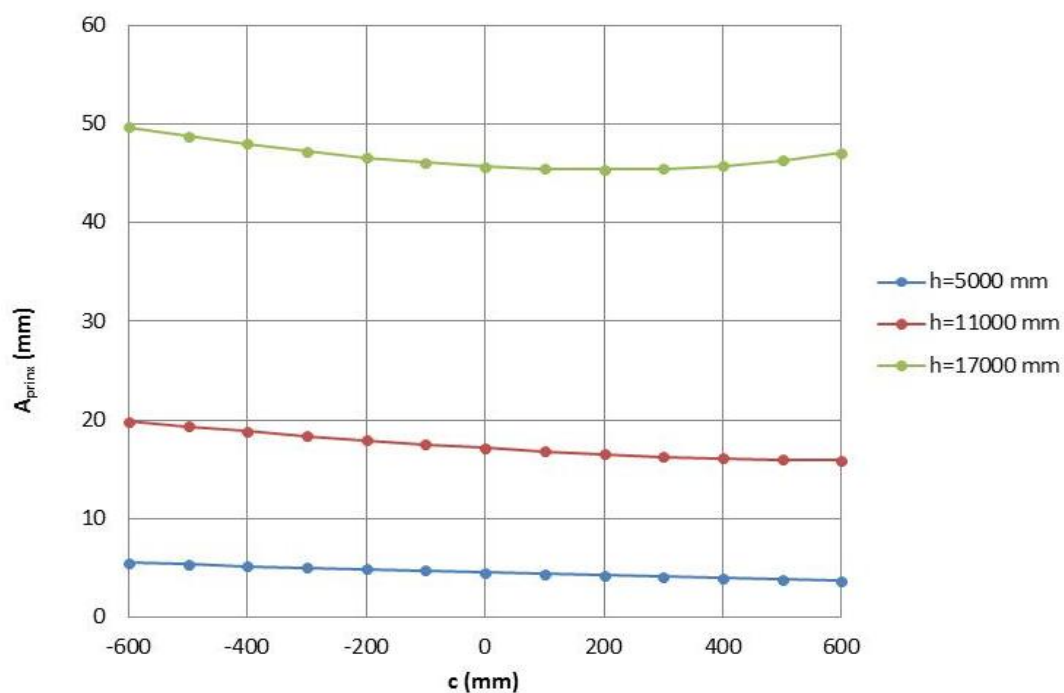


Gráfica 5.55: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 6

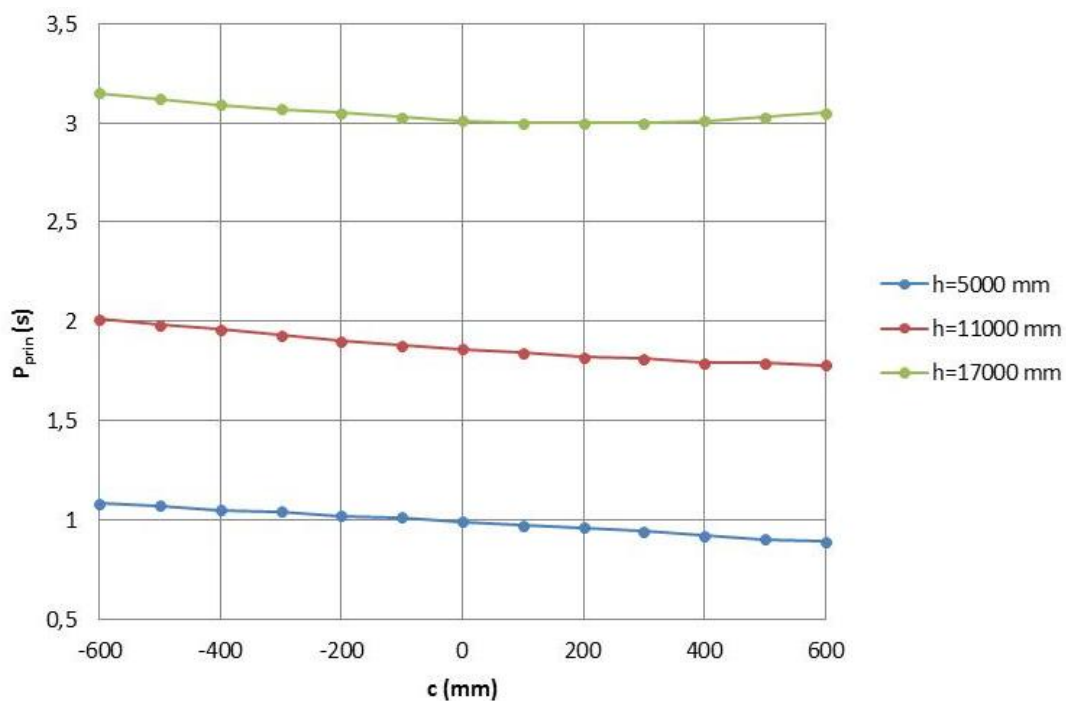
2.2.4 CASO 7: carga descentrada en $-x$ con CM bajo

En este caso, los valores de giro y desplazamiento en x iniciales son los mismos que en el caso 6 pero con signo contrario.

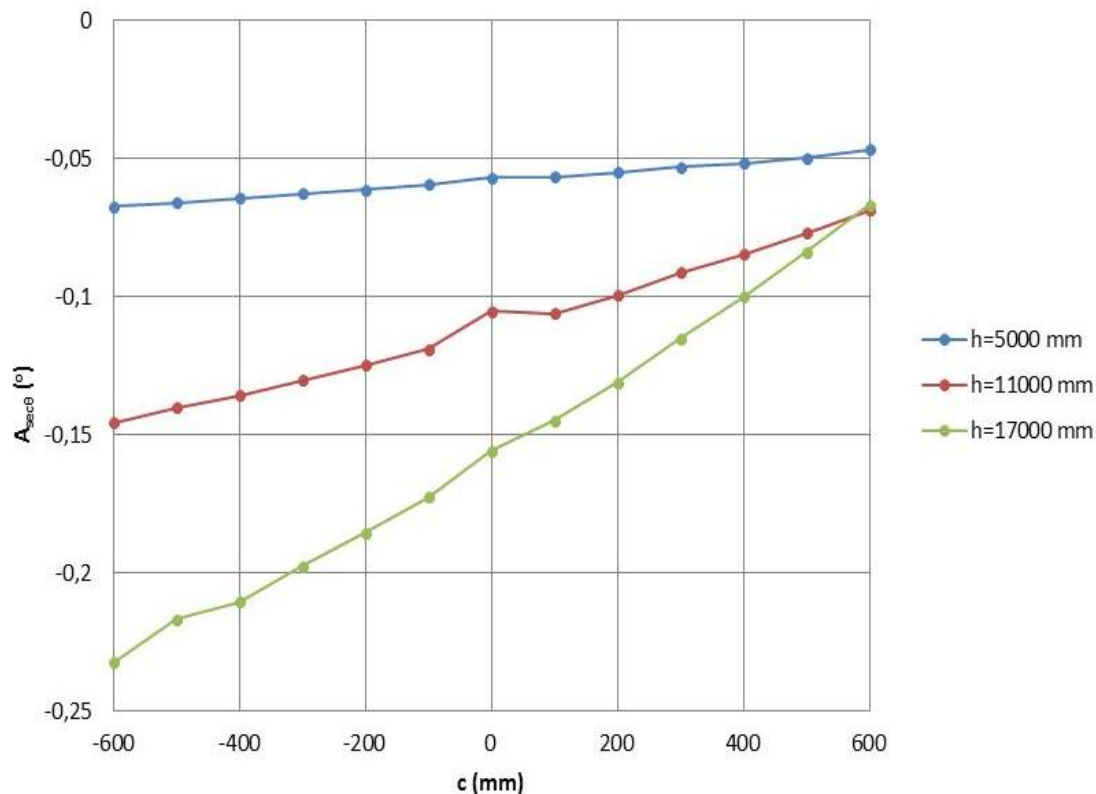
Comprobamos, con ayuda de las **Gráficas 5.56, 5.57 y 5.58** y comparándolas con las del caso 3, que el descentramiento realizado en la carga suspendida no tiene prácticamente efecto sobre el armónico principal, algo que venimos viendo desde el caso 4, y que, efectivamente, también se cumple también para el caso en el que nos encontramos.



Gráfica 5.56: Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x (A_{pirnx}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 7



Gráfica 5.57: Periodo del armónico principal (P_{prin}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 7

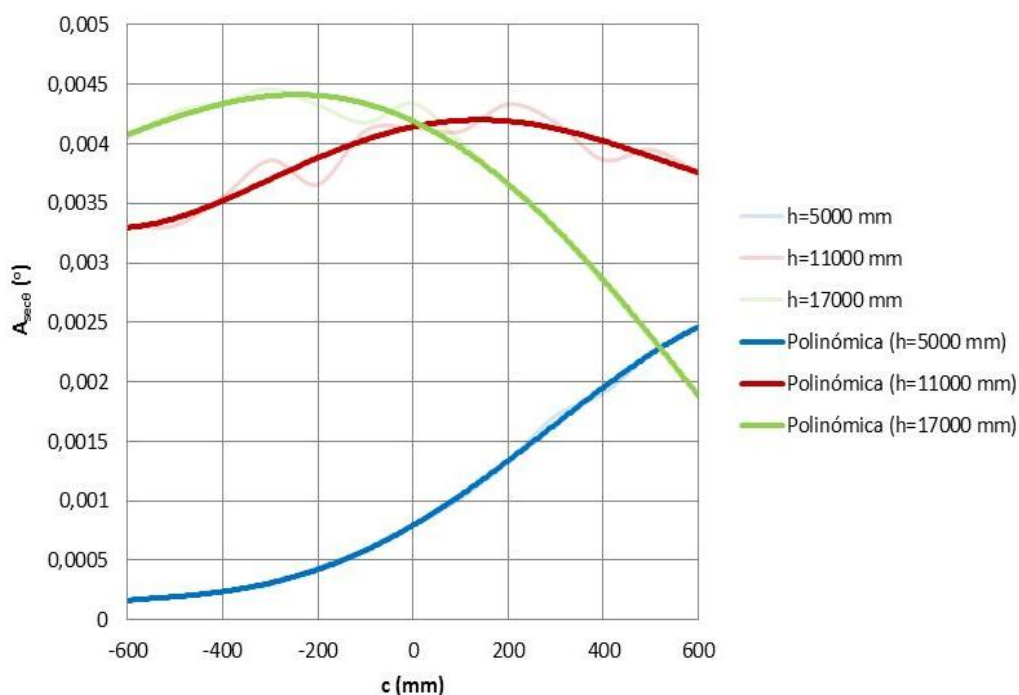


Gráfica 5.58: Amplitud del armónico principal en referencia al giro de la carga suspendida ($A_{prin\theta}$) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 7

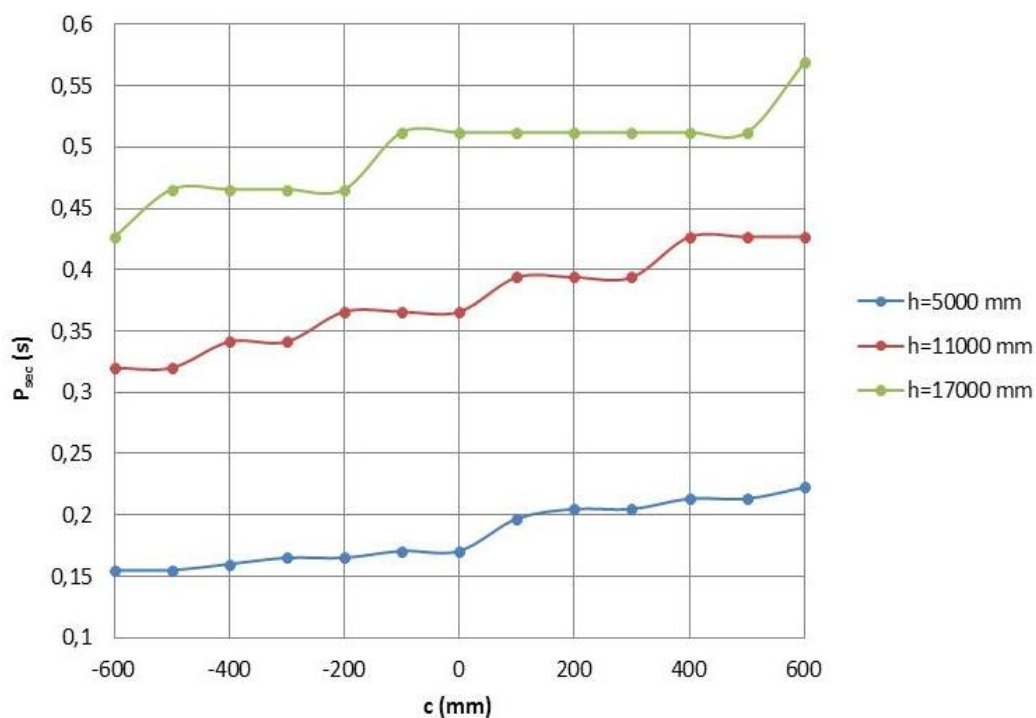
Hacemos lo mismo con el armónico secundario. Nos fijamos en las **Gráficas 5.59 y 5.60**, y comparándolas con las del caso 3, observamos que el descentramiento de la carga realizado en este caso no tiene casi efecto sobre el armónico secundario.

Por último, pasamos a fijarnos en las curvas de tensión máxima adimensional total, que podemos ver en la **Gáfica 5.61**, y hacemos un pequeño análisis sobre las tensiones en los cables, las cuales sí cambian sus valores debido al descentramiento de la carga.

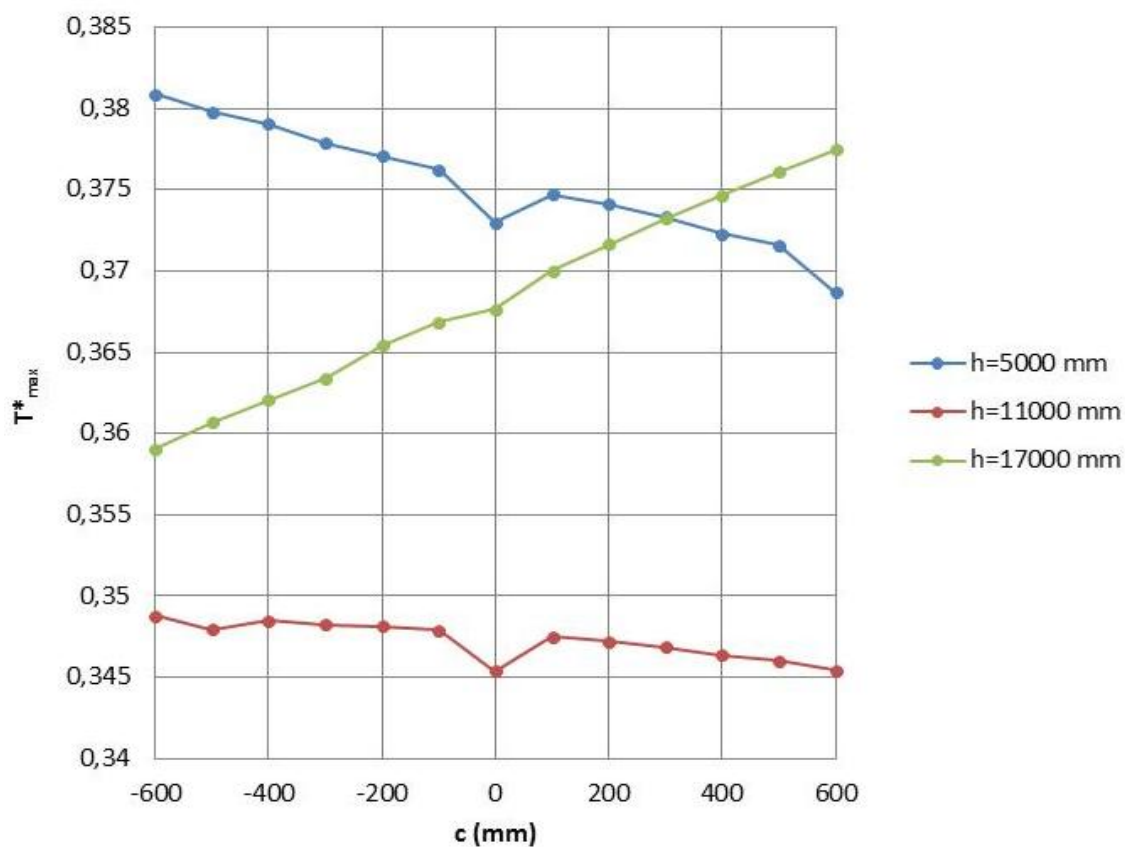
La tensión máxima adimensional total se obtiene en los cables 1 (cuando la curva desciende) y 3 (cuando la curva asciende). Los cables que menos trabajan son el 2 y el 4 con valores de tensión máxima adimensional de aproximadamente 0,2, los cuales son alrededor de 1,5 veces menores que los obtenidos de tensión máxima adimensional total en cada simulación.



Gráfica 5.59: Amplitud del armónico secundario (A_{secB}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 7



Gráfica 5.60: Periodo del armónico secundario (P_{sec}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 7



Gráfica 5.61: Tensión máxima adimensional total (T^*_{max}) en función del cruzamiento y de la altura de suspensión para el caso 7

3 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez hemos visto los resultados obtenidos en las simulaciones en 2D, pasamos a describir algunas impresiones sobre los mismos. A continuación, exponemos 5 puntos sobre lo que nos parece más importante resaltar en estas simulaciones en 2D:

1. Movimiento de la carga suspendida compuesto por 2 armónicos.

Hemos podido apreciar cómo el movimiento de nuestro sistema para las simulaciones en 2D está compuesto básicamente por dos armónicos. Uno de ellos es el que consideramos principal y produce el balanceo de la carga suspendida, afectando principalmente a su posición relativa en x y al giro. El otro, es el que llamamos secundario y hace que aparezca cierto “cabeceo” en la citada carga, afectando principalmente al giro.

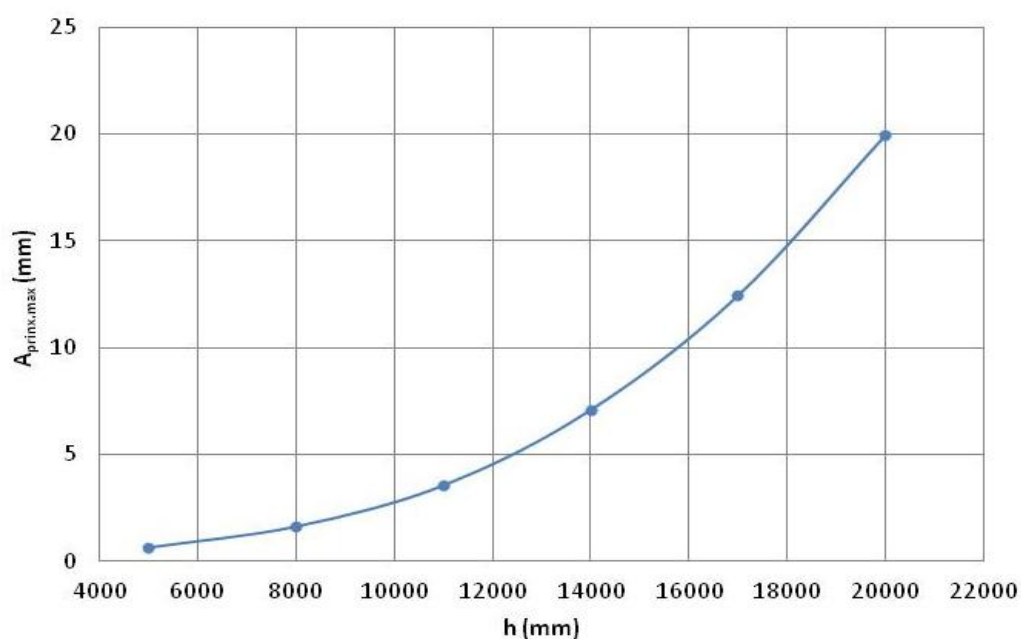
2. Elevada rigidez del sistema de cables.

Podemos afirmar que nos encontramos ante un sistema de elevación bastante rígido, que nos hará las veces de antibalanceo. Decimos esto debido a que, durante la fase de aceleración analizada con distintos casos de distribución de carga, alturas de suspensión y cruzamientos, obtenemos amplitudes del armónico principal en referencia al desplazamiento relativo en x de aproximadamente 70 mm como mayor valor. Dicho valor es muy pequeño si tenemos en cuenta que estamos trabajando con alturas de suspensión de hasta 20 m .

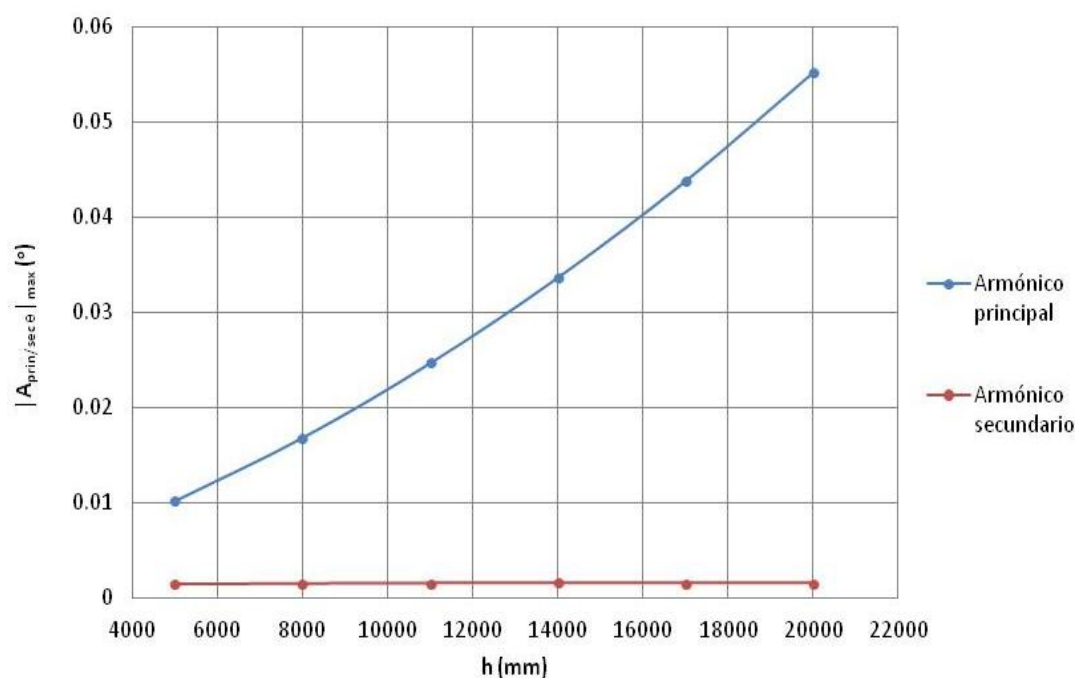
La mayor amplitud obtenida de entre todas las simulaciones en 2D de los armónicos en referencia al giro, también es bastante pequeña, de alrededor de $0,25^\circ$ y $0,0045^\circ$ para el armónico principal y secundario respectivamente (hablando de casos con carga nominal).

Mostraremos una serie de gráficas para poder observar esto de forma más clara.

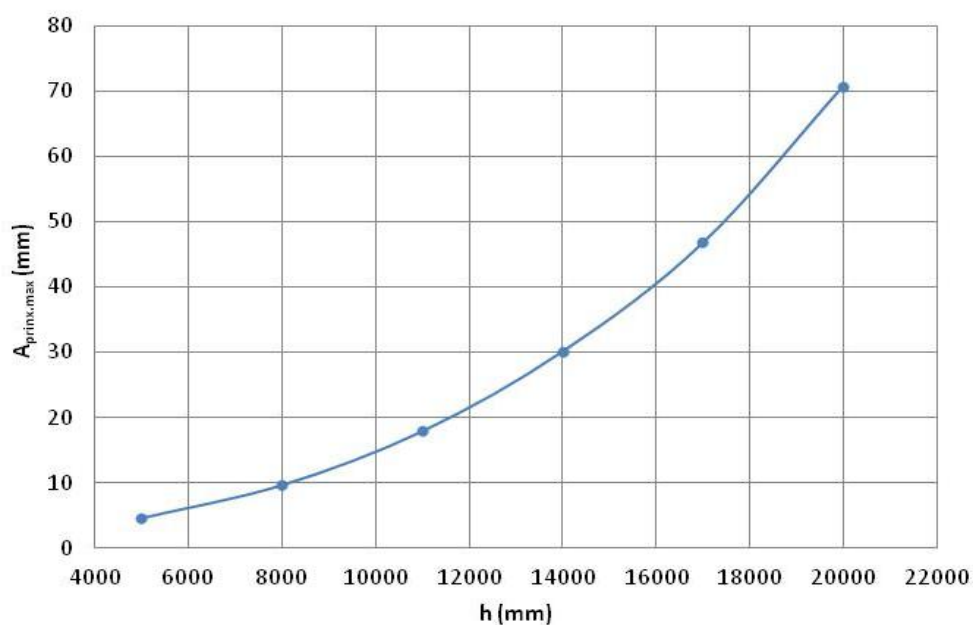
A continuación, se exponen unas curvas en las que se representa la máxima amplitud (entre todos los cruzamientos simulados) del armónico principal en referencia al desplazamiento relativo en x y al giro, así como la amplitud máxima del armónico secundario en referencia al giro. Todo ello en función de la altura de suspensión para los casos 1 (**Gráficas 5.62 y 5.63**), 2 (**Gráficas 5.64 y 5.65**) y 3 (**Gráficas 5.66 y 5.67**).



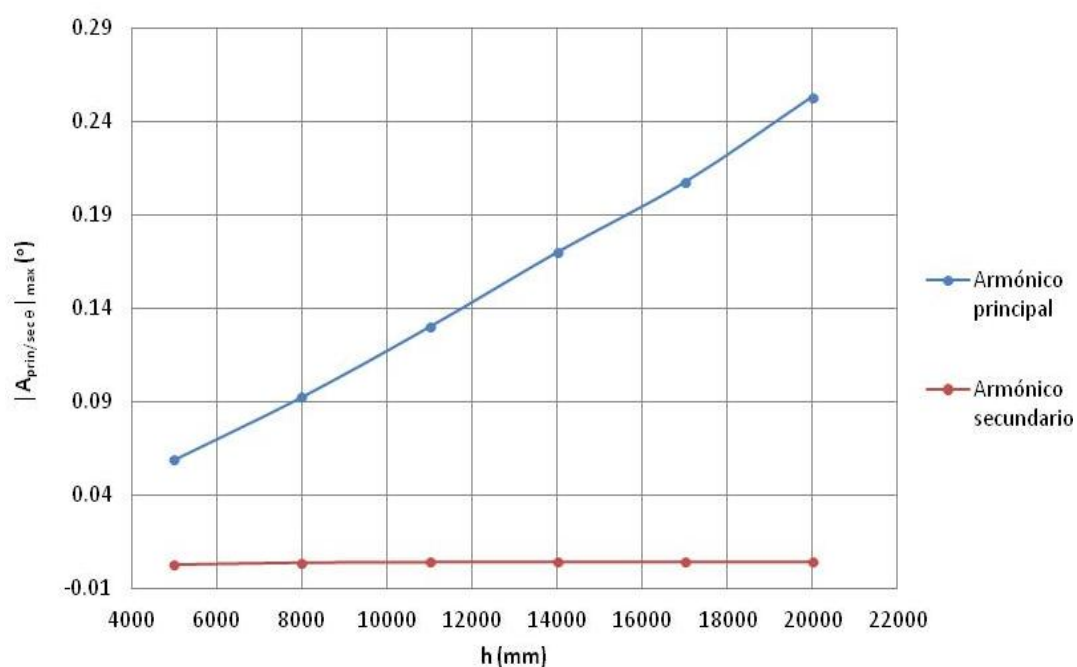
Gráfica 5.62: Curva de máxima amplitud (para todos los cruzamientos simulados) del armónico secundario en referencia al desplazamiento relativo en x ($A_{prin, max}$) en función de la altura de suspensión para el caso 1



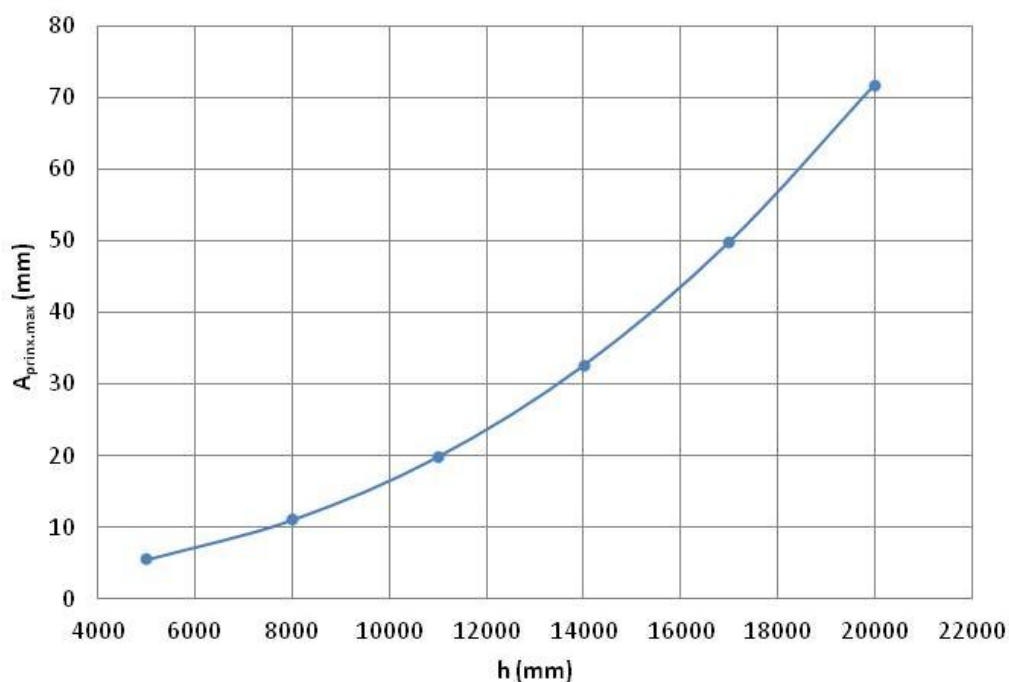
Gráfica 5.63: Curvas de máximo valor absoluto de la amplitud (para todos los cruzamientos simulados) de los armónicos en referencia al giro ($|A_{prin/sec} \theta|_{max}$) en función de la altura de suspensión y del armónico (principal o secundario) para el caso 1



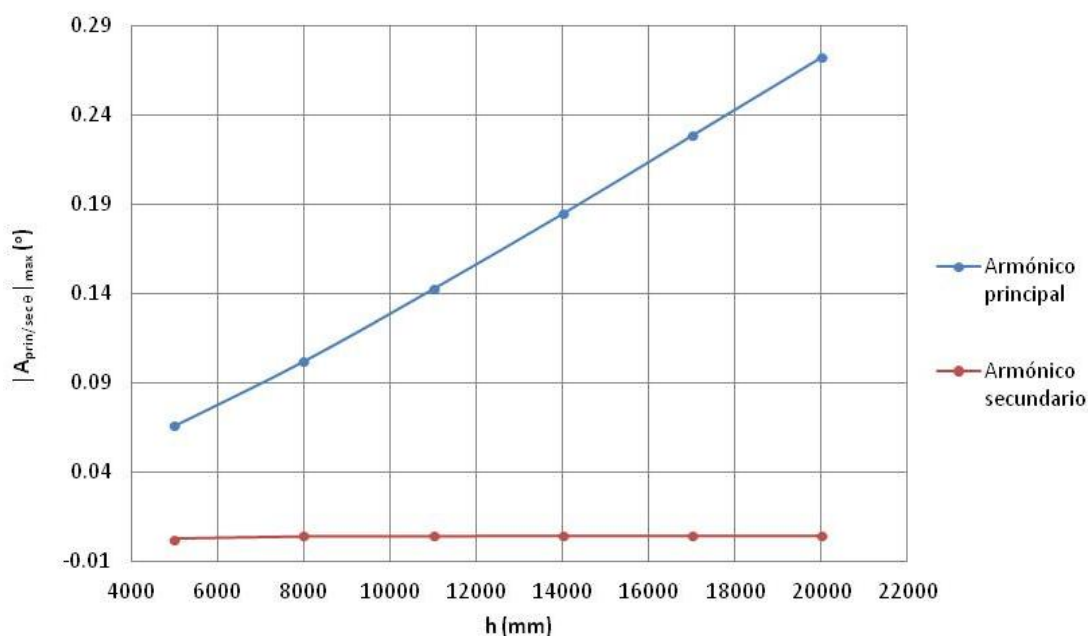
Gráfica 5.64: : Curva de máxima amplitud (para todos los cruzamientos simulados) del armónico secundario en referencia al desplazamiento relativo en x ($A_{prin,max}$) en función de la altura de suspensión para el caso 2



Gráfica 5.65: Curvas de máximo valor absoluto de la amplitud (para todos los cruzamientos simulados) de los armónicos en referencia al giro ($|A_{prin/sec \theta}|_{max}$) en función de la altura de suspensión y del armónico (principal o secundario) para el caso 2



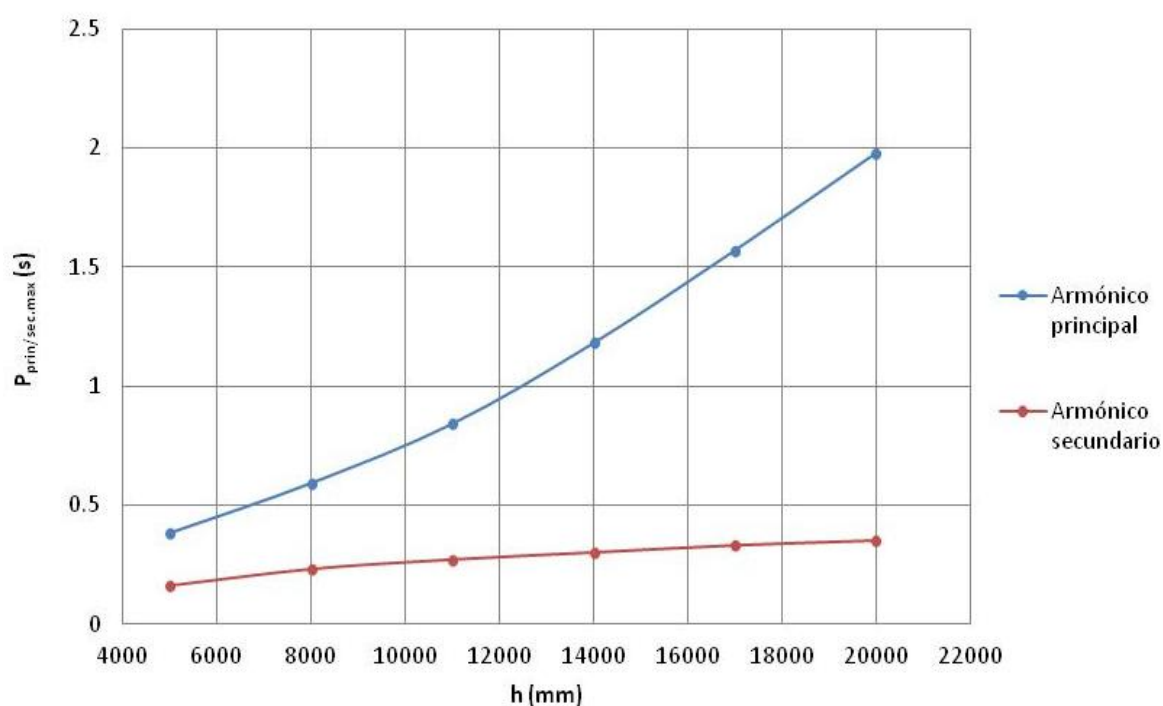
Gráfica 5.66: Curva de máxima amplitud (para todos los cruzamientos simulados) del armónico secundario en referencia al desplazamiento relativo en x ($A_{prin,max}$) en función de la altura de suspensión para el caso 3



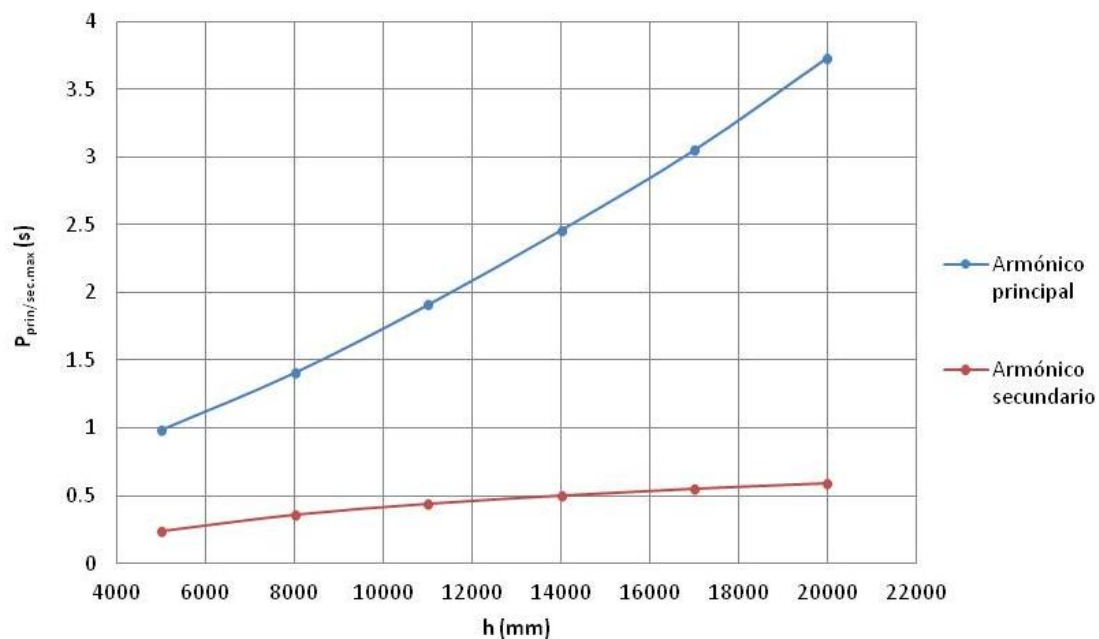
Gráfica 5.67: Curvas de máximo valor absoluto de la amplitud (para todos los cruzamientos simulados) de los armónicos en referencia al giro ($|A_{prin/sec \theta}|_{max}$) en función de la altura de suspensión y del armónico (principal o secundario) para el caso 3

En un sistema con una elevada rigidez, también encontramos periodos de oscilación bastante pequeños. Nosotros en particular, obtenemos periodos de oscilación en el armónico principal de alrededor de 3,7 s como valores máximos para el caso 3, que es en el que se encuentran los mayores periodos, y mayor altura de suspensión (20000 mm). En cuanto al armónico secundario, obtenemos periodos en torno a 0,6 s para el citado caso y altura de suspensión.

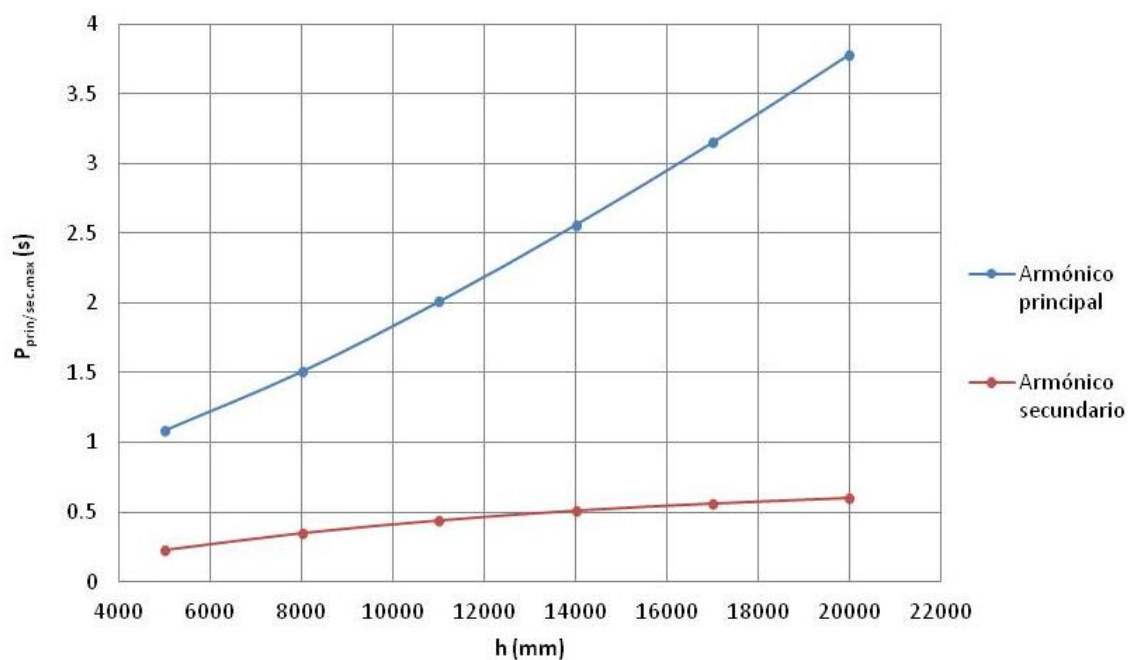
Como hemos hecho anteriormente con las amplitudes, vamos a mostrar una serie de curvas, en las que se representa el mayor periodo del armónico principal y secundario obtenido de entre todos los cruzamientos simulados, en función de la altura de suspensión para los casos 1 (Gráfica 5.68), 2 (Gráfica 5.69) y 3 (Gráfica 5.70).



Gráfica 5.68: Curvas de máximo periodo de los armónicos de entre todos los cruzamientos simulados ($P_{prin/sec.max}$) en función de la altura de suspensión y del armónico (principal o secundario) para el caso 1



Gráfica 5.69: Curvas de máximo periodo de los armónicos de entre todos los cruzamientos simulados ($P_{prin/sec.max}$) en función de la altura de suspensión y del armónico (principal o secundario) para el caso 2



Gráfica 5.70: Curvas de máximo periodo de los armónicos de entre todos los cruzamientos simulados ($P_{prin/sec.max}$) en función de la altura de suspensión y del armónico (principal o secundario) para el caso 3

3. Escaso efecto del descentramiento en el movimiento de la carga suspendida.

Concluimos que el descentramiento realizado en la carga suspendida, aunque cambia sensiblemente las tensiones en los cables, no afecta prácticamente nada al movimiento de la misma respecto a su caso homólogo de carga centrada.

4. Elección del cruzamiento que utilizaremos en las simulaciones 3D.

Llega el momento de elegir el cruzamiento con el que trabajaremos en las simulaciones en 3D. Es importante señalar, que no existe una solución única que sea óptima en cuanto a menor oscilación posible de la carga suspendida en los armónicos estudiados, todo dependerá de la búsqueda de un compromiso entre diferentes factores.

Nosotros tomaremos como referencia los datos sacados de los distintos casos usados para las simulaciones, además de otras consideraciones. Sin embargo, para una elección definitiva más fiable del cruzamiento que finalmente usaría la grúa, habría que realizar un análisis estadístico de las cargas que maneja dicho aparato y de nuevo simular si fuese necesario. Una vez se tengan los resultados, se decide el efecto que se quiere primar para, por último, y tomando además en consideración otros factores, como son por ejemplo los referentes al diseño de los componentes de la grúa, tomar la decisión definitiva sobre el cruzamiento. Todo esto queda como trabajo futuro.

En la **Tabla 5.8**, se muestran los intervalos de cruzamiento recomendables (siempre tomando como referencia alturas de entre 11 y 17 m) en función de la posición en y del centro de masa de la carga suspendida (además de incluir el caso de contenedor vacío) y de la amplitud de la que estamos hablando. Recordar que hemos realizado las simulaciones con valores de cruzamiento comprendidos en el intervalo entre -600 y 600 mm.

Con los datos mostrados en dicha tabla, podemos descartar el utilizar valores de cruzamiento negativo, ya que únicamente serían recomendables si nos interesara mejorar la amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x en caso de tener contenedor vacío. Para la misma amplitud, en el resto de casos analizados, el valor óptimo se obtiene para cruzamientos positivos entre 200 y 500 mm aproximadamente. Es de esperar que para cargas intermedias, el cruzamiento recomendable se vaya situando entre de los valores mostrados para contenedor vacío y para los casos con contenedor con carga nominal.

Aparte, como ya se señaló en ocasiones anteriores, el uso de cruzamientos negativos supondría una complicación añadida en el diseño del sistema de elevación, debido a que habría que encontrar un lugar de las poleas en el carro y de anclaje de los cables al *spreader* de manera que éstos no entraran en contacto durante el funcionamiento de la instalación. Además, dicha colocación de los cables podría dar lugar a una serie de momentos en la carga suspendida que empeorarían su movimiento.

Si hablamos de amplitud de los armónicos en referencia al giro, se aprecia que sería conveniente utilizar valores de cruzamiento altos.

	Contenedor vacío	Contenedor con carga nominal y CM alto ($y_{CM}=1644,76 \text{ mm}$)	Contenedor con carga nominal y CM bajo ($y_{CM}=1644,76 \text{ mm}$)
Amplitud del armónico principal en referencia a la posición relativa en x	c en torno a -200 mm	c en el intervalo entre 150 y 400 mm	c en el intervalo entre 200 y 500 mm
Amplitud del armónico principal en referencia al giro	c en el intervalo entre 400 y 600 mm	c lo más grande posible	c lo más grande posible
Amplitud del armónico secundario en referencia al giro	c en torno a 500 mm	c lo más grande posible	c lo más grande posible

Tabla 5.8: Cruzamiento aproximado recomendado para distintos casos de distribución de la carga (en función de la posición en y y del CM cargado el contenedor con carga nominal, además del caso de contenedor vacío) para obtener un buen comportamiento en cuanto a amplitud de los armónicos.

Visto esto, teniendo en cuenta que los periodos de los armónicos no son demasiado importantes en nuestro análisis y, estudiando además los modelos de grúas de la competencia que utilizan el sistema de elevación en *reeving*, **decidimos fijar un cruzamiento de $c=250 \text{ mm}$** . Dicho valor, nos ofrecerá un comportamiento bastante aceptable en el movimiento de la carga suspendida en desplazamiento relativo en x en el armónico principal, sacrificando en cierta medida el comportamiento respecto del giro tanto en el armónico principal como del secundario, aunque no en exceso. El cruzamiento elegido será el que usaremos en todas las simulaciones en 3D.

5. Trabajo de los cables.

Para una visión más clara de lo que vamos a exponer en este punto, hemos creído conveniente mostrar, en la **Figura 5.149**, una imagen del sistema en la que se observa cómo hemos nombrado a cada uno de los cables del sistema de elevación.

Una vez tenemos clara la nomenclatura y situación de los distintos cables, pasamos a ver cuáles son los que soportan mayores y menores tensiones en la fase de aceleración del carro, así como los valores de las mismas.

En la **Tabla 5.9**, se muestran los cables que soportan mayor o menor tensión, en función del caso de distribución de la carga en el que nos encontremos.

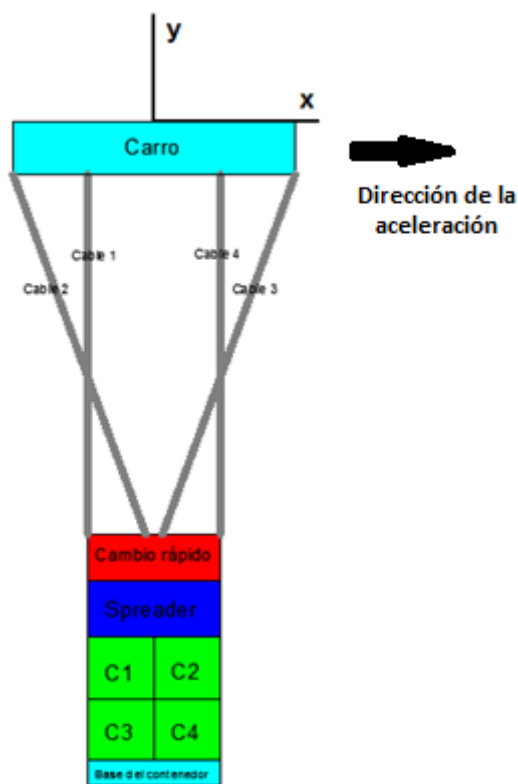


Figura 5.149: Figura para recordar cómo han sido nombrados los cables que forman el sistema

	Cable que soporta más carga	Cable que soporta menos carga
Casos con carga centrada	Cable 3 o 4	Cable 2
Casos con carga descentrada en $+x$	Cable 3 o 4	Cable 1
Casos con carga descentrada en $-x$	Cable 1 o 3	Cable 2 o 4

Tabla 5.9: Cables que soportan la mayor y la menor carga en las simulaciones en función del caso de distribución de la carga

Entre los distintos casos y alturas de suspensión simulados, la máxima tensión que se obtiene en los cables, para el cruzamiento antes fijado ($c=250\text{ mm}$), ronda los 112 kN . El tipo de cable que utilizan estas grúas, del cual hablamos en el Capítulo 2 de esta memoria, puede soportar perfectamente esta tensión, ya que, con el diámetro de cable utilizado (30 mm), la tensión mínima a rotura de dicho elemento ronda los 802 kN .

La máxima tensión que se alcanza en los cables que menos carga soportan suele ser entre 1,3 y 2,5 veces menor que la tensión máxima total del sistema en cada simulación. Para casos en los que la carga está centrada o descentrada en $-x$, las diferencias entre las dos tensiones antes mencionadas son las más pequeñas, mientras que cuando la carga se encuentra descentrada en $+x$ se obtienen las diferencias más grandes.



CAPÍTULO 6

Resultados de las simulaciones en 3D

De la misma forma que hicimos con la parte de simulaciones en 2D, al principio de este capítulo mostraremos una imagen en la que se muestra de nuevo el sistema de coordenadas que se utiliza durante las simulaciones (**Figura 6.150**).

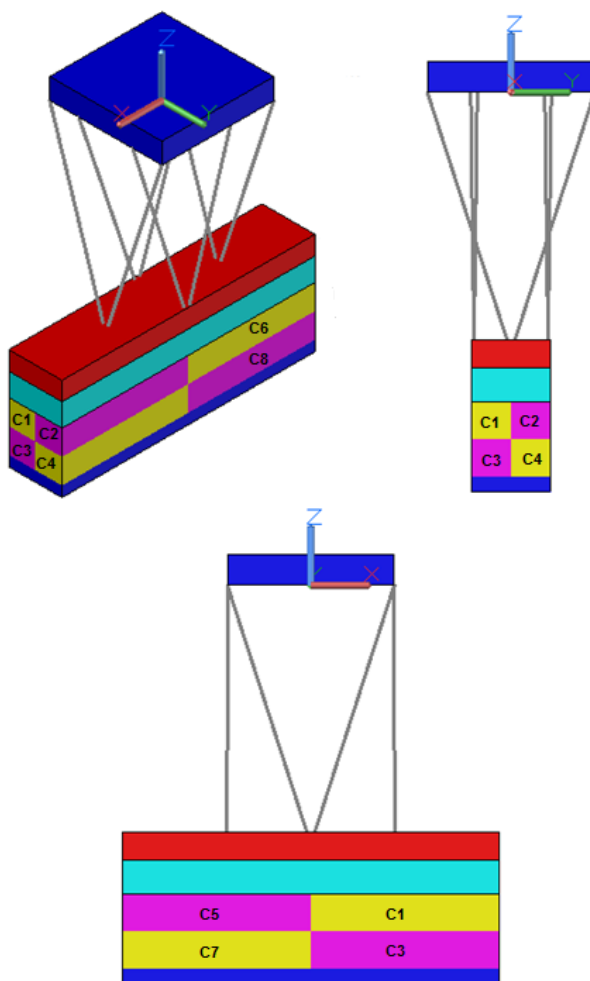


Figura 6.150: Posición del sistema de coordenadas utilizado en las simulaciones con el distinto posicionamiento de los elementos C_i

Recordamos que en las simulaciones en 3D, induciremos aceleración al carro tanto en la dirección del mismo como del pórtico, con un valor de $0,2 \text{ m/s}^2$ en ambos casos. La aceleración en la dirección del carro será aplicada en el sentido positivo del eje y , y la aceleración en la dirección del pórtico en el sentido positivo del eje x . Además, recordamos que en todas las simulaciones en 3D utilizaremos una altura de suspensión constante de valor 14000 mm .

En la **Tabla 3.7**, en el Capítulo 3, se exponen los distintos resultados que se quieren sacar de las simulaciones en 3D, con la nomenclatura que se va a utilizar.

1 ANÁLISIS DE LA PRIMERA SIMULACIÓN

Comenzaremos con una primera simulación para ver si las tensiones en los cables, así como los periodos y amplitudes vistos en la parte del 2D, son más o menos parecidos. Además, veremos cómo aparecen movimientos que no podíamos percibir en las simulaciones en 2D como por ejemplo el giro de la carga suspendida en z.

Para esta primera simulación elegimos el CASO 1 (carga centrada), con aceleración en la dirección del carro. Como hemos señalado antes, utilizaremos una altura de suspensión $h=14000\text{ mm}$ y los anclajes de cables al cambio rápido y al carro que aparecen en la **Figura 6.151**.

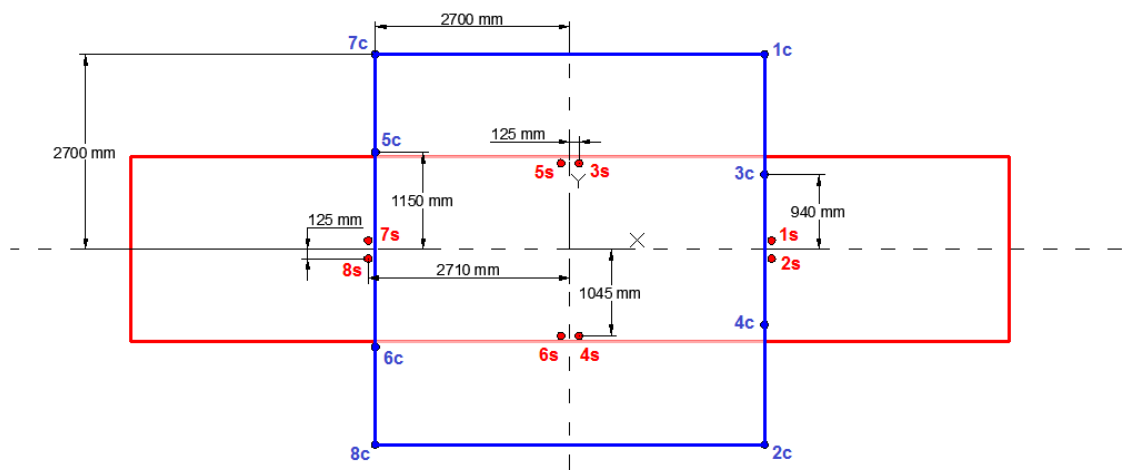
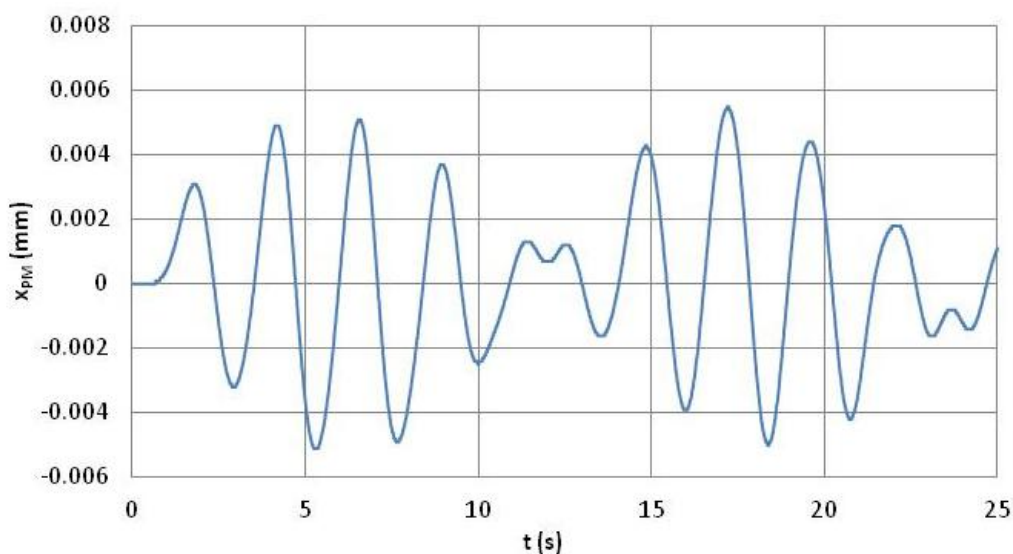


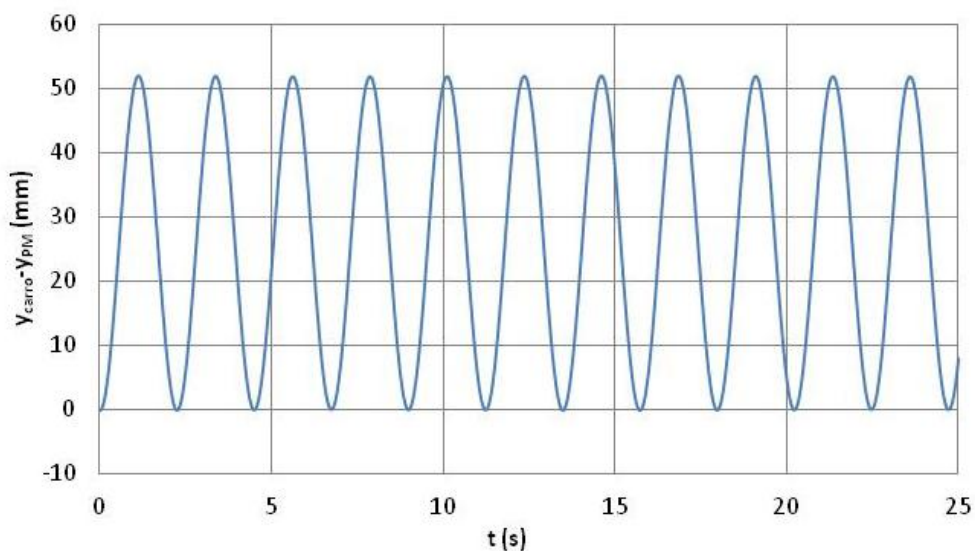
Figura 6.151: Vista en planta del sistema con las cotas de los puntos de amarre de los cables al carro (en azul) y al cambio rápido (en rojo) utilizados en la primera simulación en 3D.

Mostramos, a continuación, los datos de posiciones y giros de la carga suspendida obtenidos en esta primera simulación en 3D. Comenzamos con el desplazamiento en x de la carga suspendida en función del tiempo, cuya curva podemos observar en la **Gráfica 6.71**.

El movimiento anteriormente mencionado no podíamos verlo en las simulaciones en 2D. Aparte, si el sistema tuviese el amarre al carro de la pareja de cables 3 y 4 simétrico respecto del plano $x=0$ al de la pareja de cables 5 y 6, este desplazamiento no aparecería. Veremos cómo es de grande el citado movimiento en comparación con el balanceo principal (posición relativa en y), el cual se muestra en la **Gráfica 6.72**.



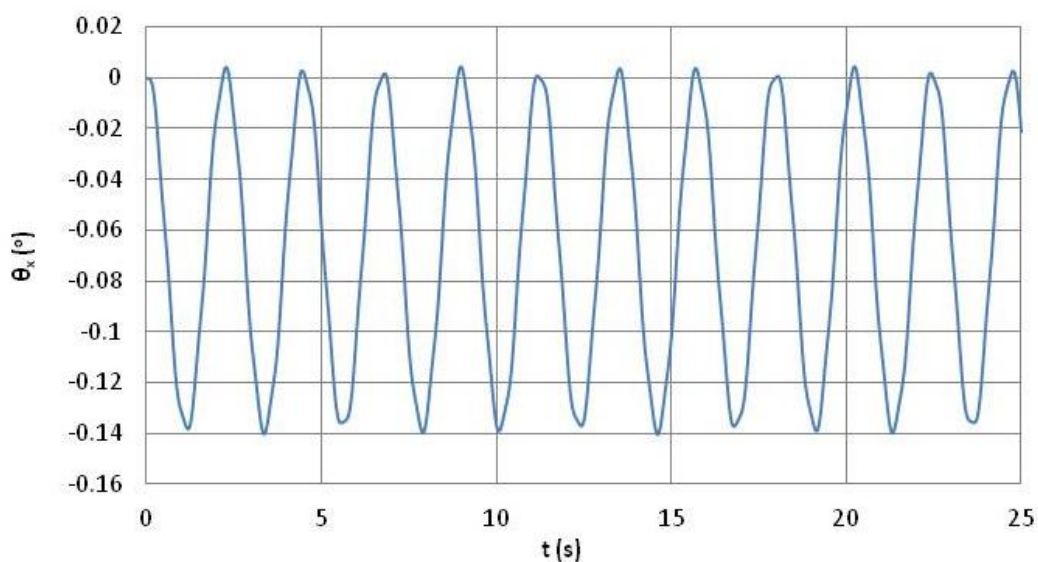
Gráfica 6.71: Posición en x del punto de medida (x_{PM}) en función del tiempo para la simulación inicial



Gráfica 6.72: Posición relativa en y del punto de medida ($y_{carro} - y_{PM}$) en función del tiempo para la simulación inicial

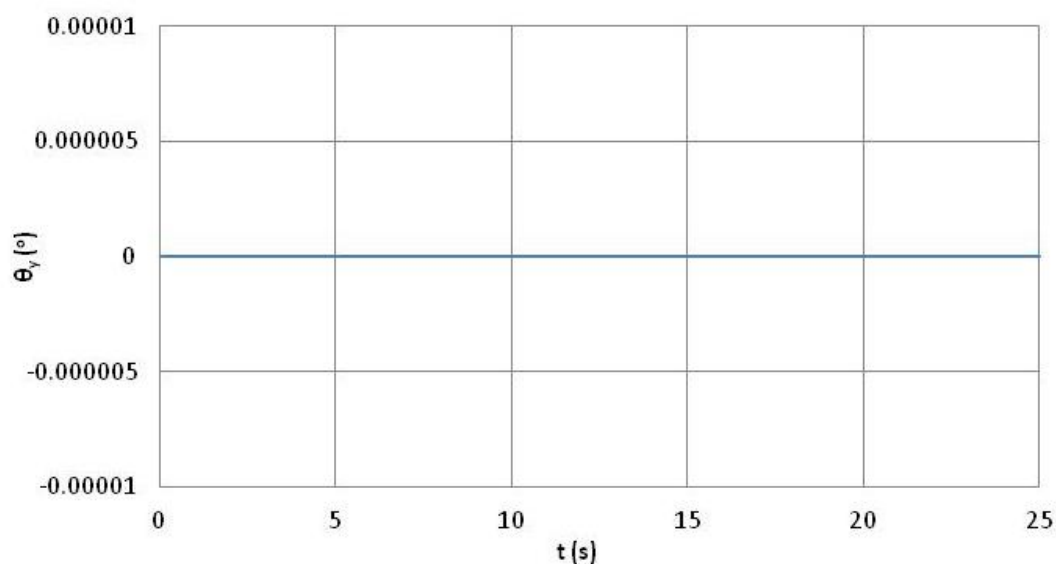
Observando las Gráficas 6.71 y 6.72, podemos decir que el desplazamiento en x es muy pequeño comparado con el balanceo principal. Aparte, si nos vamos al Anexo IV, vemos que el movimiento de balanceo, representado por las respectivas posiciones relativas, es prácticamente igual en el 2D y en el 3D (para un cruzamiento entre 200 y 400 mm). En la mínima diferencia en amplitud y periodo entre ambos modelos es posible que influyan las pequeñas diferencias en las medidas de los elementos, los amarres de los cables y el punto de toma de medidas entre ambos casos. El valor máximo de desplazamiento relativo en ambos modelos ronda los 54 mm y el periodo los 2,25 s.

El giro en x del 3D (**Gráfica 6.73**) también es bastante parecido al giro de la carga suspendida en 2D, algo que podemos comprobar si vamos al Anexo IV.



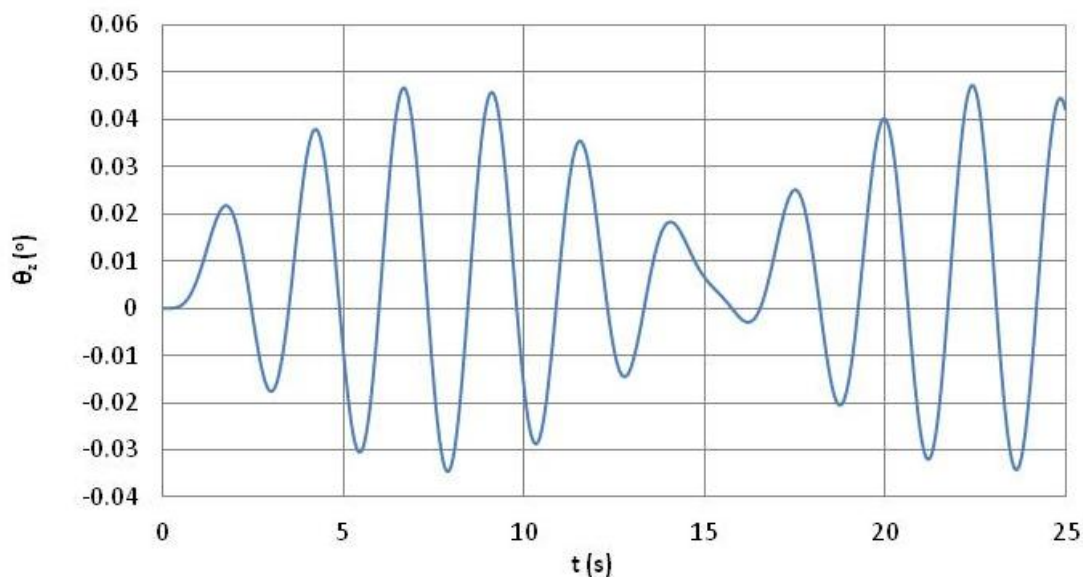
Gráfica 6.73: Giro en x de la carga suspendida (θ_x) en función del tiempo para la simulación inicial

En cuanto al giro en y (**Gráfica 6.74**), podemos decir que, a pesar de la no simetría antes mencionada, el giro en y de la carga suspendida es inapreciable.



Gráfica 6.74: Giro en y de la carga suspendida (θ_y) en función del tiempo para la simulación inicial

Como ya se ha señalado en ocasiones anteriores, vemos que en esta simulación en 3D, aparece un giro en z en la carga (**Gráfica 6.75**), el cual hay que tener en cuenta. Sería importante minimizar en lo posible el citado movimiento para obtener un buen comportamiento de la misma.

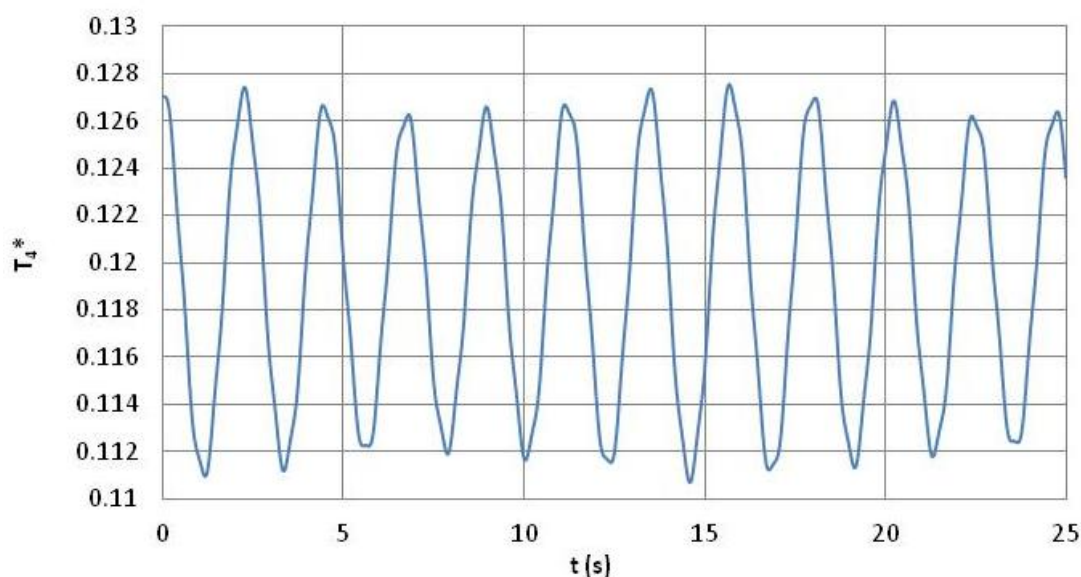


Gráfica 6.75: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función del tiempo para la simulación inicial

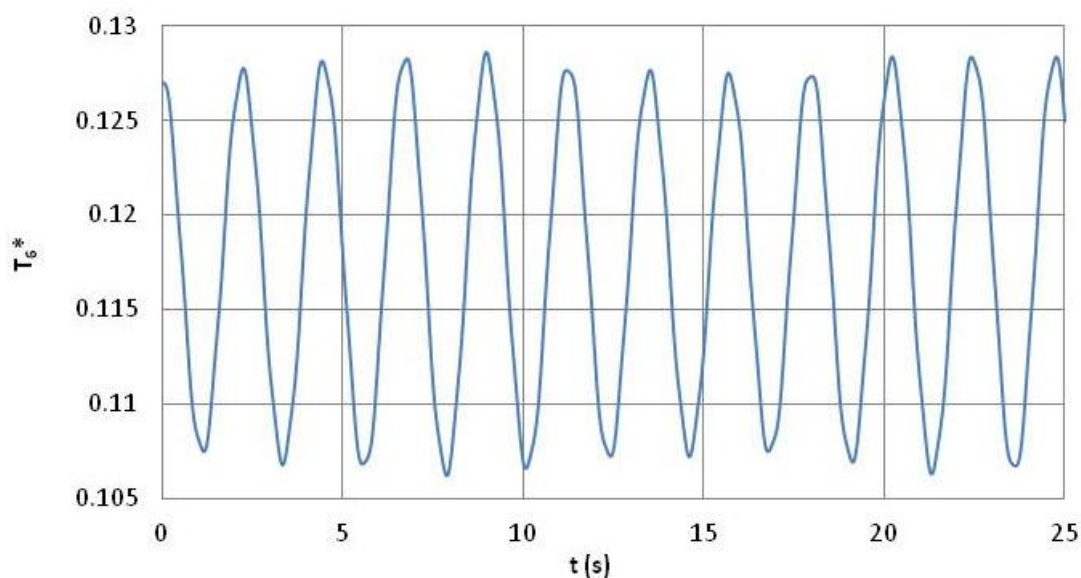
En cuanto a las tensiones en los distintos cables que forman el sistema, tomaremos un par de ejemplos para ver su coincidencia, o no, con los resultados obtenidos en el 2D.

En las **Gráficas 6.76 y 6.77**, podemos ver las tensiones obtenidas en los cables 4 y 6. Si el sistema fuese simétrico respecto del plano $x=0$, ambas gráficas deberían ser idénticas, ya que en esta simulación estamos trabajando con carga centrada. Sin embargo, al no existir esa simetría, vemos que obtenemos resultados algo distintos.

Los cables 4 y 6 del 3D corresponden al cable 1 del 2D. Si multiplicamos las tensiones de estos cables en 3D por 2 (debido a que en el 2D se adimensionalizaron las tensiones con la mitad de la masa de la carga suspendida) obtenemos más o menos una gráfica parecida a la del cable homólogo en 2D (ver Anexo IV). Esto era de esperar si vemos que anteriormente coincidían bastante bien las gráficas de desplazamientos y giros en ambos casos.

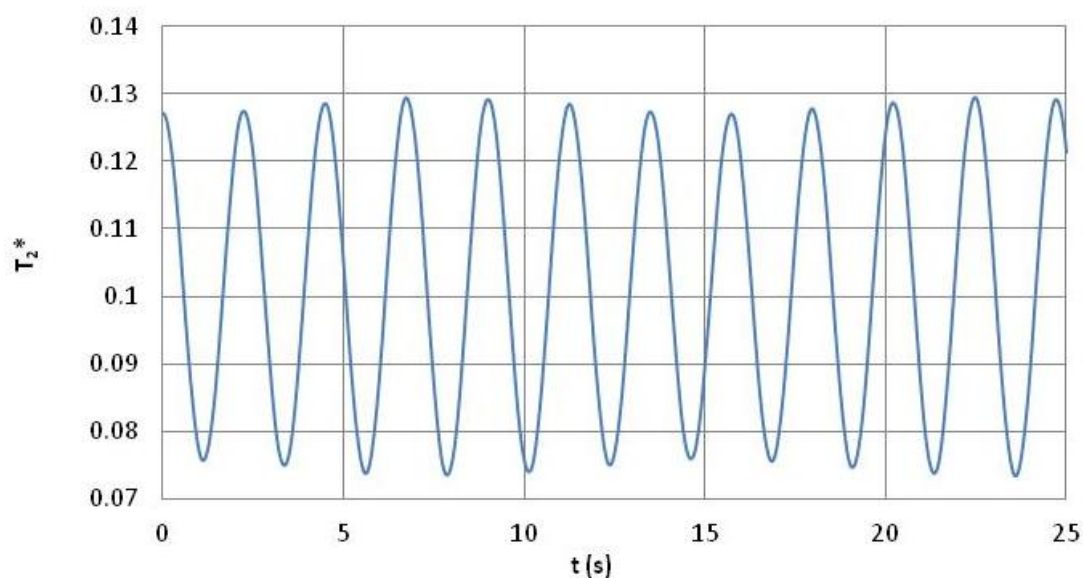


Gráfica 6.76: Tensión adimensional del cable 4 (T_4^*) en función del tiempo para la simulación inicial

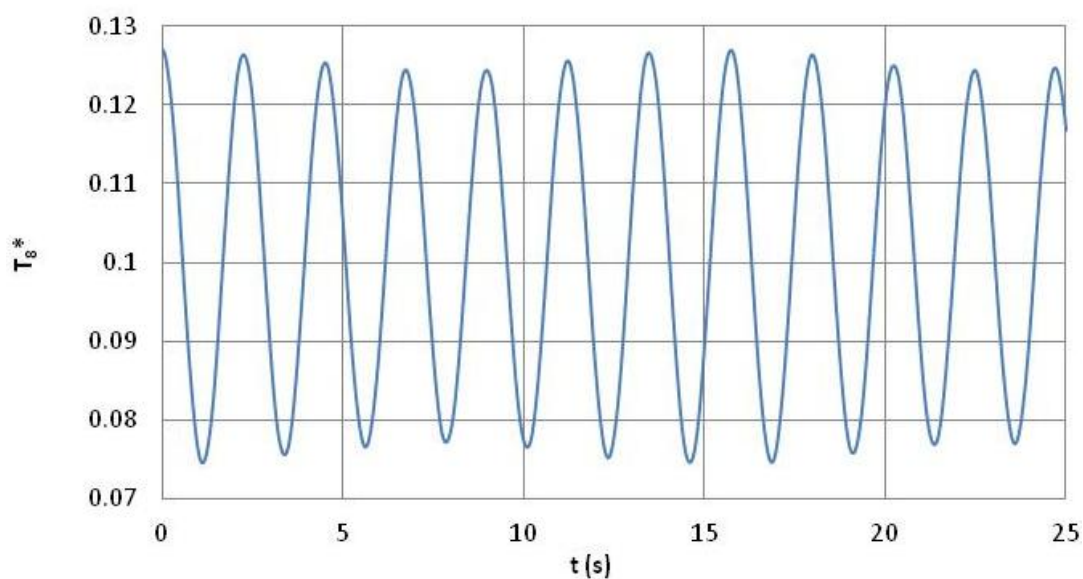


Gráfica 6.77: Tensión adimensional del cable 6 (T_6^*) en función del tiempo para la simulación inicial

Del mismo modo, las tensiones entre los cables 2 y 8, cuyas curvas se encuentran en las **Gráficas 6.78 y 6.79**, aunque bastante parecidas, no son iguales debido de nuevo a la falta de simetricidad del sistema respecto al plano $x=0$. Dichos cables del 3D corresponden al cable 2 del 2D y, de la misma forma que hemos explicado antes, si multiplicamos por 2 los valores de tensiones adimensionales de los cables del 3D, obtenemos una gráfica muy parecida a la del cable homólogo en 2D. Una vez más, podemos comprobar esto yendo al Anexo IV.



Gráfica 6.78: Tensión adimensional del cable 2 (T_2^*) en función del tiempo para la simulación inicial



Gráfica 6.79: Tensión adimensional del cable 8 (T_8^*) en función del tiempo para la simulación inicial

En el resto de cables del sistema ocurre lo mismo que acabamos de explicar con los dos ejemplos anteriores, por lo que no nos pararemos más en este asunto.

Una vez vistas las gráficas de la simulación inicial, podemos sacar principalmente dos conclusiones:



-
1. Las curvas de movimientos y tensiones obtenidas en el 2D y en el 3D son bastante **parecidos** para la altura de suspensión y cruzamiento seleccionado, algo que refuerza la validez de las aproximaciones realizadas en el modelo 2D.
 2. Como era de esperar, **en el modelo en 3D, surgen una serie de movimientos y giros en la carga suspendida que no podíamos ver en la parte en 2D**, como por ejemplo el giro en z.

2 RESULTADOS FINALES

2.1 SIMULACIONES CON VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE AMARRE DE LOS CABLES AL CARRO Y AL CAMBIO RÁPIDO

Como ya se ha explicado en capítulos anteriores, en este punto, realizaremos simulaciones con distintos casos de distribución de la carga en el contenedor y con aceleración en la dirección del carro y del pórtico. Además, introduciremos una serie de parámetros que modificarán los amarres de los cables en el carro y en el cambio rápido, con los cuales buscaremos una solución convincente que minimice en la medida de lo posible los distintos movimientos y giros de la carga suspendida.

Recordamos que la altura de suspensión será $h=14000\text{ mm}$, el cruzamiento tendrá un valor de $c=250\text{ mm}$ y la aceleración que se le aplicará al carro (tanto en la dirección del mismo como en la del pórtico) será de $0,2\text{ m/s}^2$. Recordamos también, que la aceleración en la dirección del pórtico será aplicada al carro en el sentido positivo del eje x y la aceleración en la dirección del carro será aplicado a este elemento en el sentido positivo del eje y .

En la **Figura 6.152**, se muestran de nuevo las distintas cotas del modelo (en su vista en planta) con los parámetros antes mencionados.

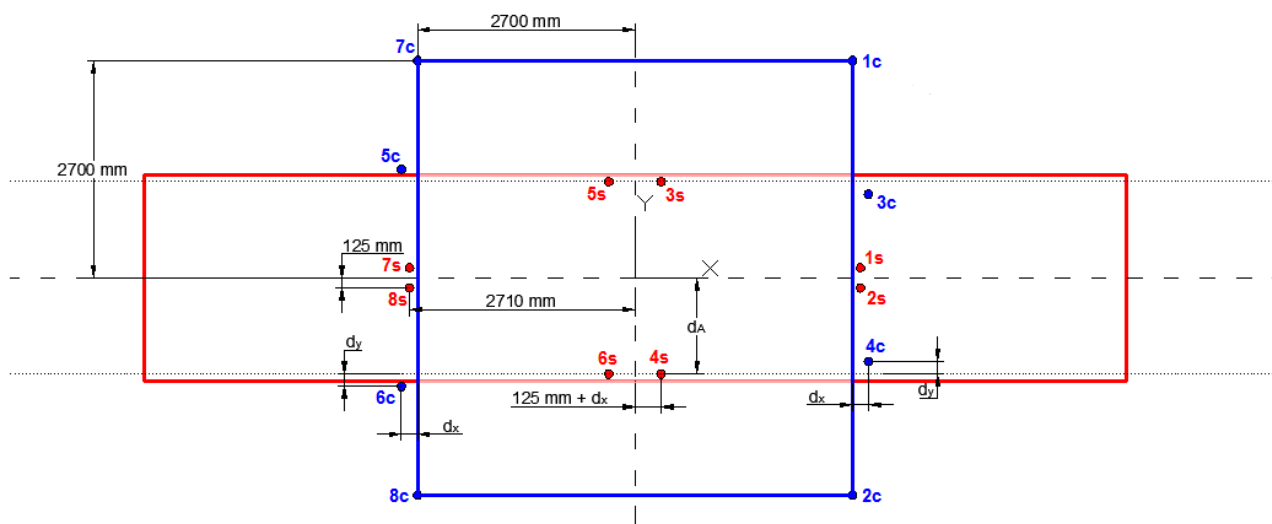


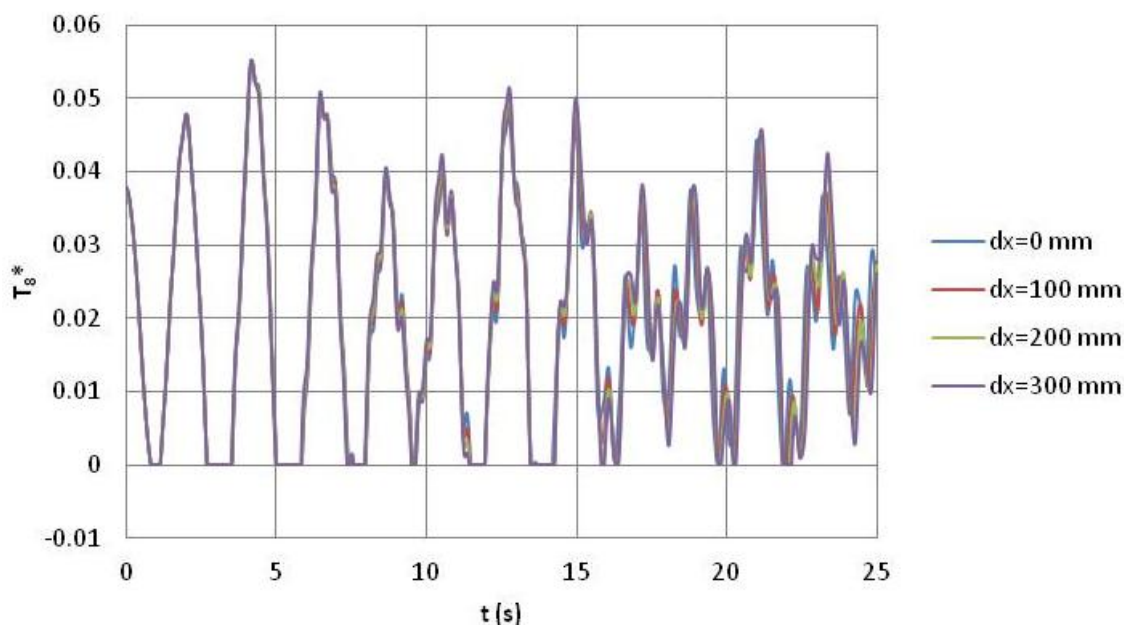
Figura 6.152: Vista en planta del sistema para la visualización de los parámetros d_x , d_y y d_A

2.1.1 ACELERACIÓN EN LA DIRECCIÓN DEL CARRO

Antes de comenzar con el efecto que tendría variar los parámetros d_x , d_y y d_A sobre el movimiento de la carga suspendida, vamos a ver cuáles son los valores máximos de giros, desplazamientos y tensiones que nos hemos encontrado en este apartado. Hacemos esto para tener una idea de los órdenes de magnitud de cada uno de ellos:

- El máximo valor de desplazamiento relativo en y se obtiene cuando la carga está descentrada en $+y$, el cual ronda los 90 mm
- El desplazamiento en x máximo se da cuando la carga está descentrada en dicho eje, llegando a alcanzar un valor que ronda los 21 mm .
- El máximo giro en x se da cuando la carga está descentrada en $+y$, rondando el valor de 1° .
- Obtenemos el máximo giro en y cuando la carga está descentrada en x , con un valor de alrededor de $0,7^\circ$ aproximadamente.
- El mayor giro en z también se da cuando la carga está descentrada en x , con un valor en torno a $0,37^\circ$.
- En cuanto a las tensiones, los mayores valores se obtienen generalmente en el cable 1, con cifras de máxima tensión adimensional alrededor de 0,29 en algunos casos. Las mínimas tensiones se suelen dar en el cable 8. Existen excepciones, como para carga centrada (caso 1) en la que la tensión en el cable 1 y el 7 (tensión máxima) es prácticamente la misma al igual que con los cables 2 y 8 (tensión mínima). Otra excepción es el caso de carga descentrada en $+y$ (caso 2) en el que las mayores tensiones se obtienen en los cables 3 y 5 y las menores en los cables 4 y 6. Una excepción más es el caso de carga descentrada en $-y$ (caso 3) en la que la máxima tensión se obtiene en los cables 2 y 7 o 4 y 6 y la mínima en los cables 3 y 5.

Hay que resaltar que en estas simulaciones, **en los casos en los que la carga está descentrada en x , obtenemos periodos en los que el cable 8 no trabaja** (ver Gráfica 6.80). Esto que hace que aparezcan curvas de movimientos, giros y tensiones más complejas si cabe.



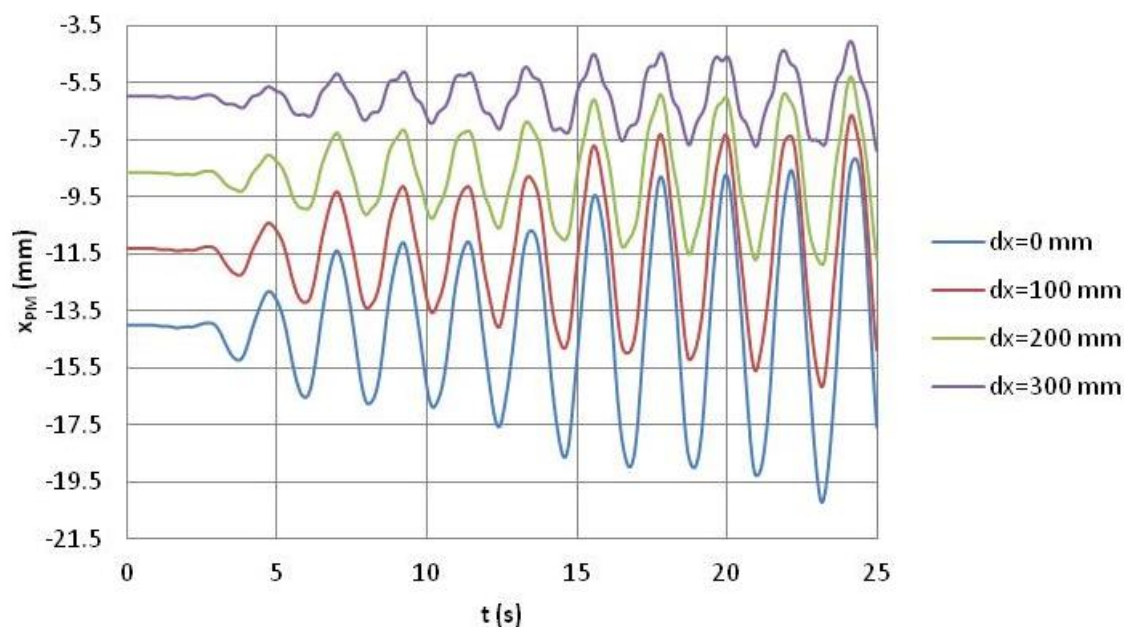
Gráfica 6.80: Tensión adimensional en el cable 8 (T_8^*) en función del parámetro d_x y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), con $d_y=100 \text{ mm}$ y $d_A=1195 \text{ mm}$

Una vez expuesto todo esto, pasamos a analizar el efecto que tiene la variación de los parámetros d_x , d_y y d_A en el movimiento de la carga suspendida.

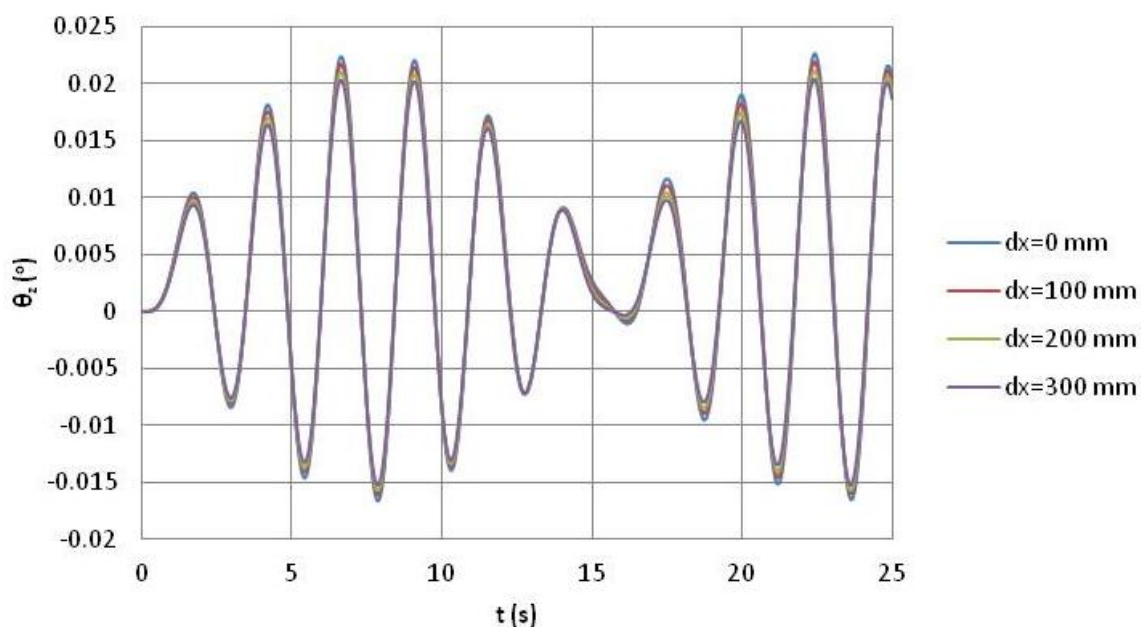
- Efecto de variar d_x

El hecho de variar el parámetro d_x tiene un efecto apreciable sobre todo en el desplazamiento de la carga suspendida en la dirección del eje x . De forma general, aumentar el valor de d_x conlleva una mejora de dicho desplazamiento, ya que se obtiene una posición inicial de equilibrio estático más cercana al origen y, en la mayor parte de los casos, una menor amplitud en la curva de dicho desplazamiento. En la Gráfica 6.81 se muestra un ejemplo de lo mencionado anteriormente utilizando el caso 4 (carga descentrada en $+x$).

Por otro lado, de forma general, la variación de d_x tiene un efecto prácticamente inapreciable respecto al giro en z de la carga suspendida, aunque en ciertos casos se muestra una pequeña mejora (menor amplitud en la gráfica del giro) al aumentar el valor del citado parámetro, pero como hemos dicho antes, la diferencia es casi nula. En la Gráfica 6.82 tenemos un ejemplo de esto usando el caso 1 (carga centrada).



Gráfica 6.81: Posición del punto de medida de la carga suspendida en x (x_{PM}) en función del parámetro d_x y del tiempo para el caso 4, con $d_y=100$ mm y $d_A=1195$ mm



Gráfica 6.82: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función del parámetro d_x y del tiempo para el caso 1, con $d_y=100$ mm y $d_A=1195$ mm

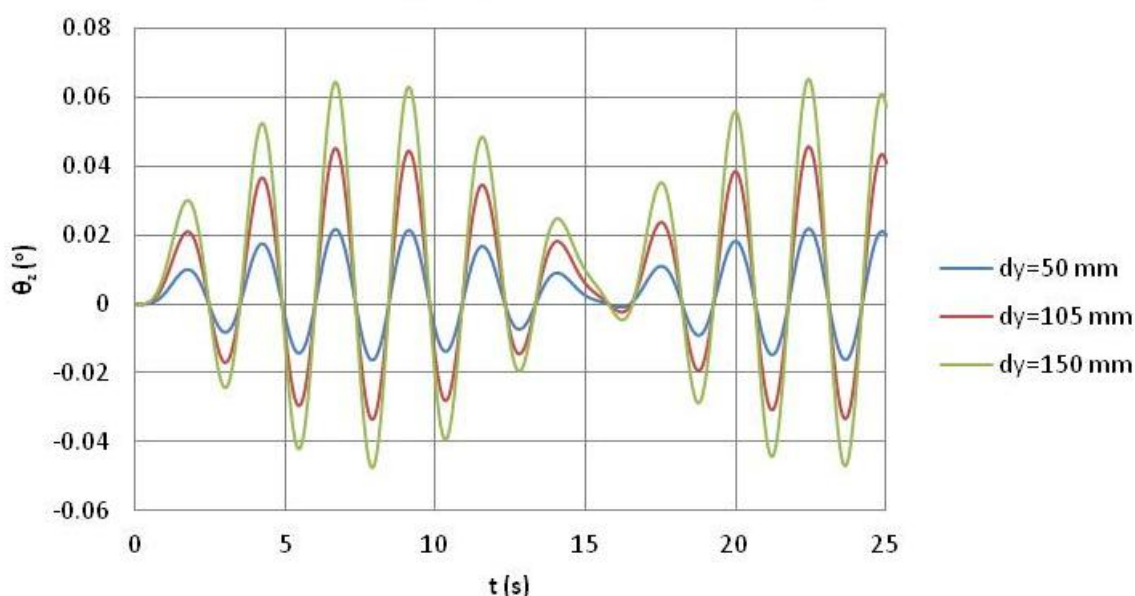
La variación del parámetro d_x no tiene un efecto reseñable en el resto de variables de movimiento estudiadas, por lo que pasamos ahora a hacer un pequeño comentario sobre las tensiones del sistema para terminar con este apartado.

Modificar el valor de d_x afecta sobre todo a las tensiones de los cables 3, 4, 5 y 6, sin embargo, las diferencias son muy pequeñas, en algunas ocasiones nulas.

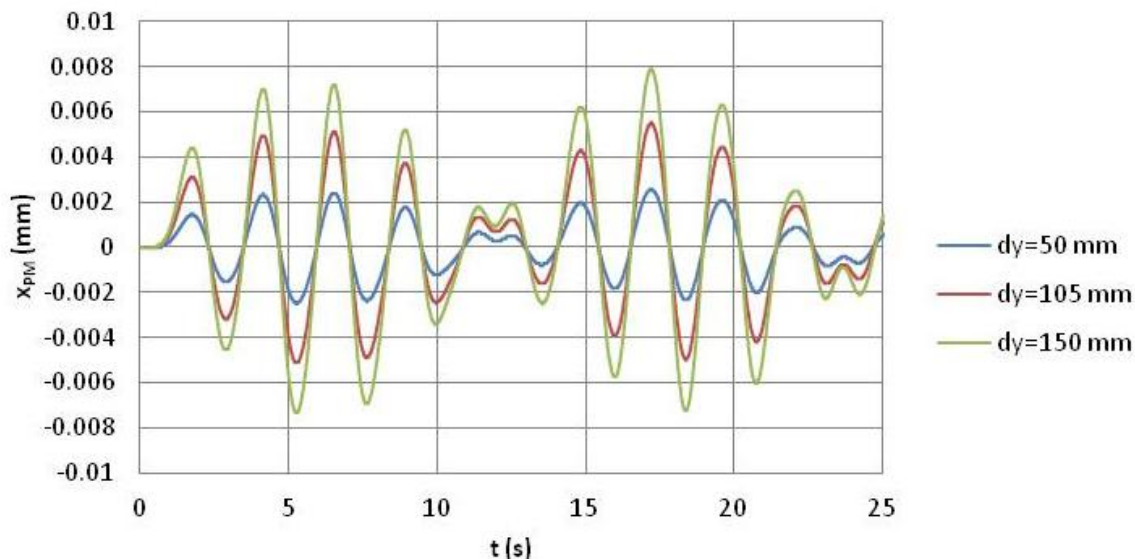
- Efecto de variar d_y

El efecto de la variación de d_y se hace notar principalmente en el caso 1 (carga centrada) y, especialmente, sobre el desplazamiento en x y el giro en z de la carga suspendida. En dicho caso, cuanto menor es d_y , menor es el giro en z y el desplazamiento en x de la carga suspendida. Si d_y fuese nulo, el giro en z y el desplazamiento en x también lo serían. Podemos observar lo dicho en las Gráficas 6.83 y 6.84.

Siguiendo con el caso 1, las tensiones que más cambian al variar d_y son las de los cables 3, 4, 5, y 6.



Gráfica 6.83: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función del parámetro d_y y del tiempo para el caso 1 (carga centrada), con $d_x=0$ mm y $d_A=1195$ mm



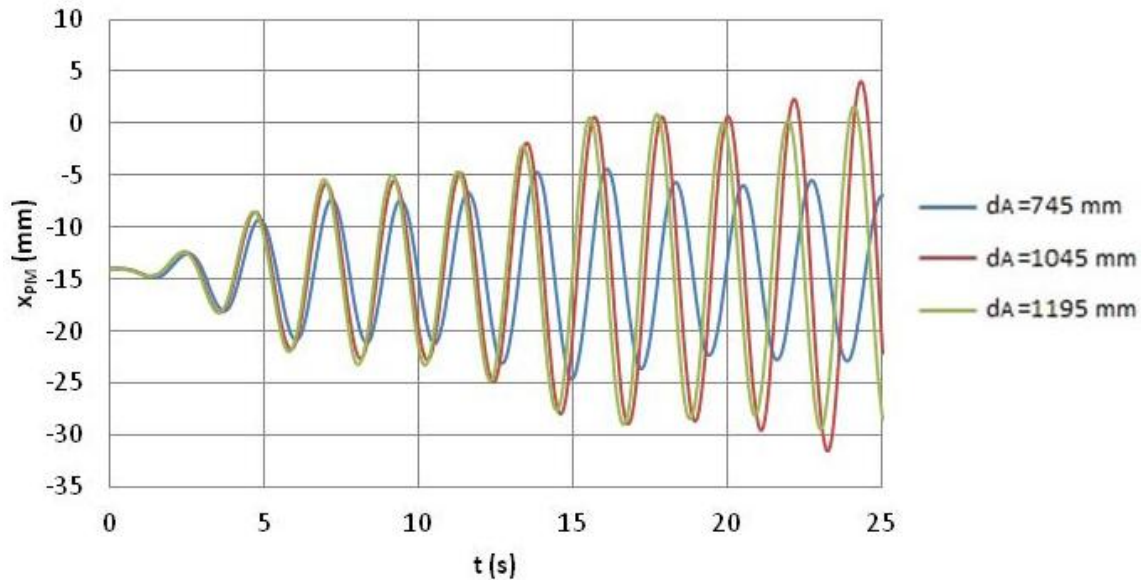
Gráfica 6.84: Desplazamiento en x del punto de medida de la carga suspendida (x_{PM}) en función del parámetro d_y y del tiempo para el caso 1 (carga centrada), con $d_x=0$ mm y $d_A=1195$ mm

Para terminar, podemos decir que en el resto de casos de distribución de la carga, variar d_y tiene un efecto prácticamente nulo sobre el comportamiento del sistema.

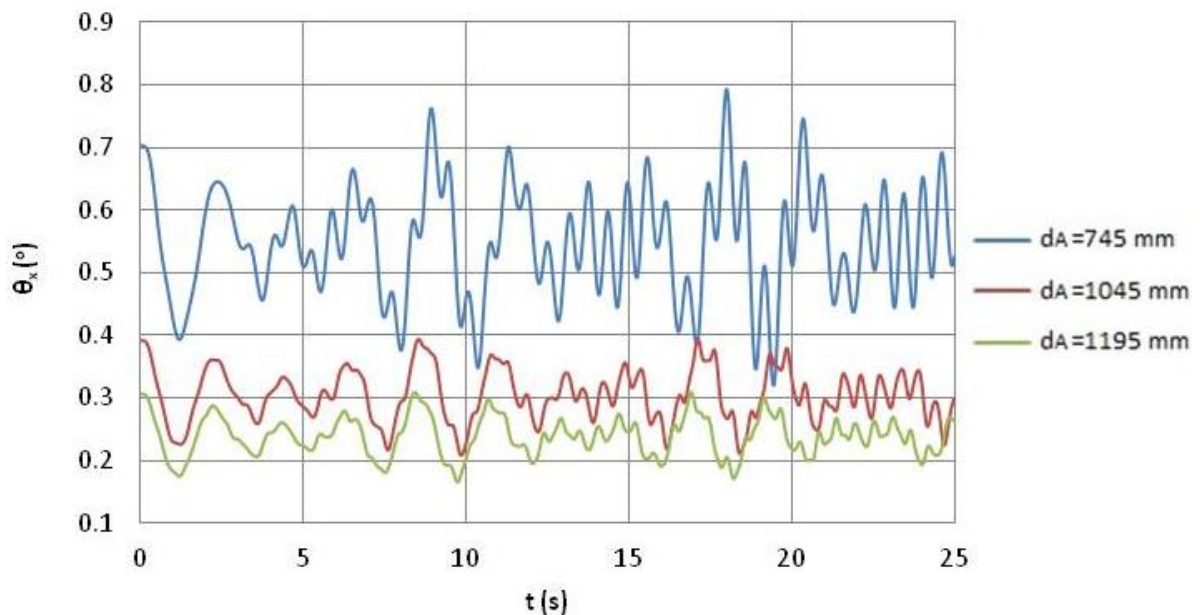
- Efecto de variar d_A

En general, el aumento de d_A (salvo para el caso con carga centrada) conlleva un aumento de la amplitud del desplazamiento en x de la carga suspendida en el tiempo utilizado en las simulaciones. Es por esto que podemos decir que a mayor d_A , peor comportamiento del sistema en este aspecto. Como ejemplo de esto tenemos la Gráfica 6.85.

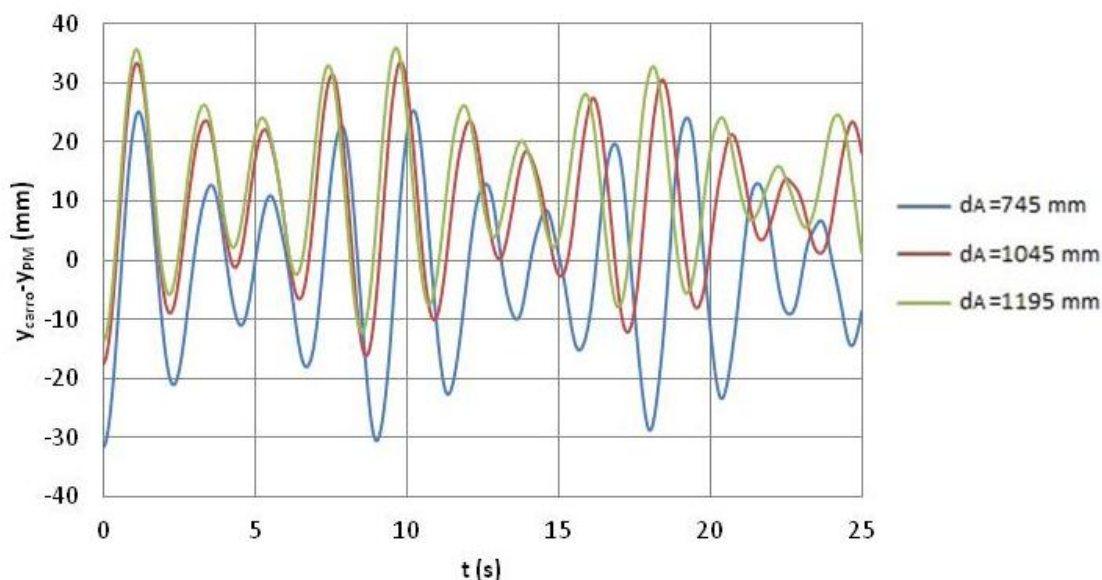
Sí parece que aumentar d_A tiene un efecto positivo en el giro en x y en el desplazamiento relativo en y de la carga suspendida, tanto en la posición inicial cuando la carga está descentrada en y , como en la amplitud del movimiento en prácticamente la totalidad de los casos de distribución de la carga. Como prueba de ello, a continuación se muestran las Gráficas 6.86 y 6.87, correspondientes al caso 7 (carga descentrada en $+x-y$).



Gráfica 6.85: Desplazamiento en x del punto de medida de la carga suspendida (x_{PM}) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm



Gráfica 6.86: Giro en x de la carga suspendida (θ_x) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 7 (carga descentrada en $+x-y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm



Gráfica 6.87: Desplazamiento relativo en y de la carga suspendida ($y_{\text{carro}} - y_{PM}$) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 7 (carga descentrada en $+x-y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm

En cuanto al giro de la carga en z , aumentar el valor de d_A mejora ligeramente el comportamiento del sistema respecto a dicha variable cuando la carga está centrada o descentrada en x , y lo empeora cuando la carga está descentrada en y solamente.

No está muy claro el efecto que el aumento de d_A tiene sobre el giro en y de la carga suspendida, ya sea porque éste es prácticamente nulo o porque en las gráficas no se puede apreciar bien, sin embargo, podemos decir que dicho efecto no es muy relevante.

De nuevo, los cables que más se ven afectados por la variación de d_A son los cables 3, 4, 5 y 6.

2.1.2 ACELERACIÓN EN LA DIRECCIÓN DEL PÓRTICO

Como hicimos en el apartado en el que se aplicaba aceleración en la dirección del carro, empezaremos mostrando los valores máximos de las variables estudiadas para hacernos una idea del orden de magnitud de las mismas:

- El desplazamiento relativo en x máximo se da cuando la carga está descentrada en $+x$, rondando los 60 mm .
- El mayor desplazamiento en y lo obtenemos cuando la carga está descentrada en x e y , con un valor de alrededor de 50 mm .
- El máximo giro en x se da cuando la carga está descentrada en $+x+y$, con un valor aproximado de $0,8^\circ$.
- El máximo giro en y se da cuando la carga está descentrada en x , con valores que rondan los $0,3^\circ$.
- El mayor giro en z lo obtenemos con carga descentrada en $-x+y$, con un valor de alrededor de $0,25^\circ$.
- Si hablamos de tensiones en los cables, no queda claro que, como en el caso anterior de aceleración en la dirección del carro, haya unos cables que más o menos siempre sean los que más trabajen y otros que sean los que menos. En esta ocasión depende bastante del caso de distribución de la carga en el que nos encontremos. El máximo valor de tensión adimensional lo hemos obtenido en el caso de carga descentrada en $+x+y$ con un valor de 0,235 aproximadamente, en el cable 1.

Hay que decir que en este conjunto de simulaciones, no hemos encontrado casos en los que haya algún cable que por momentos no se encuentre traccionado, es decir, que su tensión sea nula.

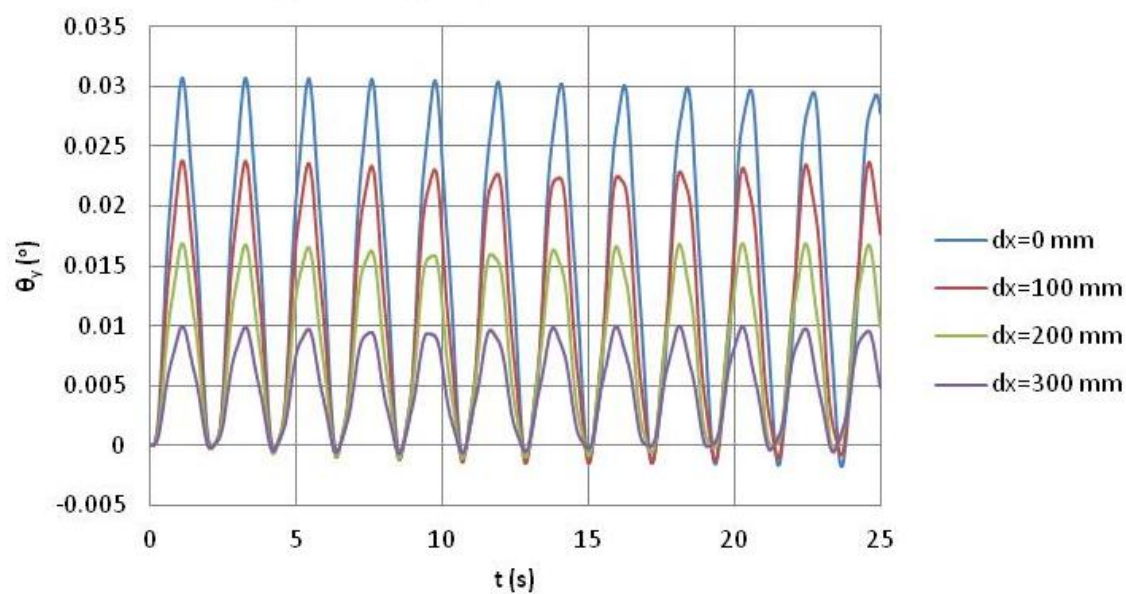
Una vez expuesto todo esto, pasamos a continuación a analizar la influencia que tiene la variación de los parámetros d_x , d_y y d_A en el comportamiento del sistema.

- Efecto de variar d_x

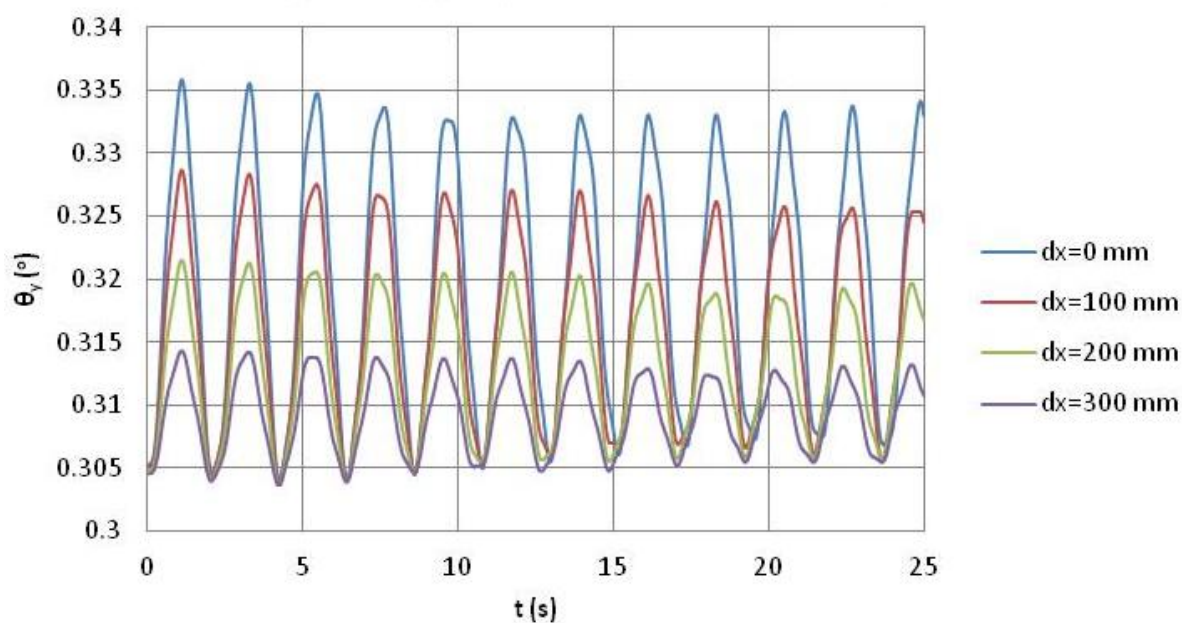
La variación del parámetro d_x afecta sobre todo al giro en y de la carga suspendida, de forma que cuanto mayor sea el valor del citado parámetro, menor es el giro experimentado por dicha carga. Podemos observar un ejemplo de esto en las Gráficas 6.88 (carga centrada) y 6.89 (carga descentrada en $+x+y$).

En el resto de variables, podemos decir que no se observan variaciones reseñables al modificar el valor del mencionado parámetro.

En cuanto a los cables, los que más se ven afectados en sus tensiones por la variación de d_x son los cables 1, 2, 7 y 8, que en este caso, no se ven afectados en la posición de sus anclajes al cambiar el valor del parámetro mencionado.



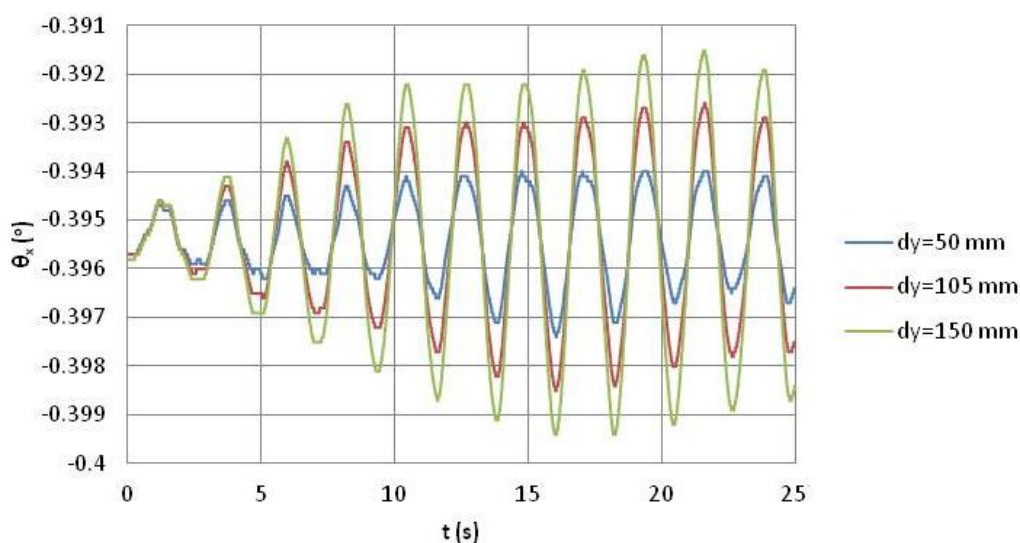
Gráfica 6.88: Giro en y de la carga suspendida (θ_y) en función del parámetro d_x y del tiempo para el caso 1 (carga centrada), con $d_A=1195$ mm y $d_y=50$ mm



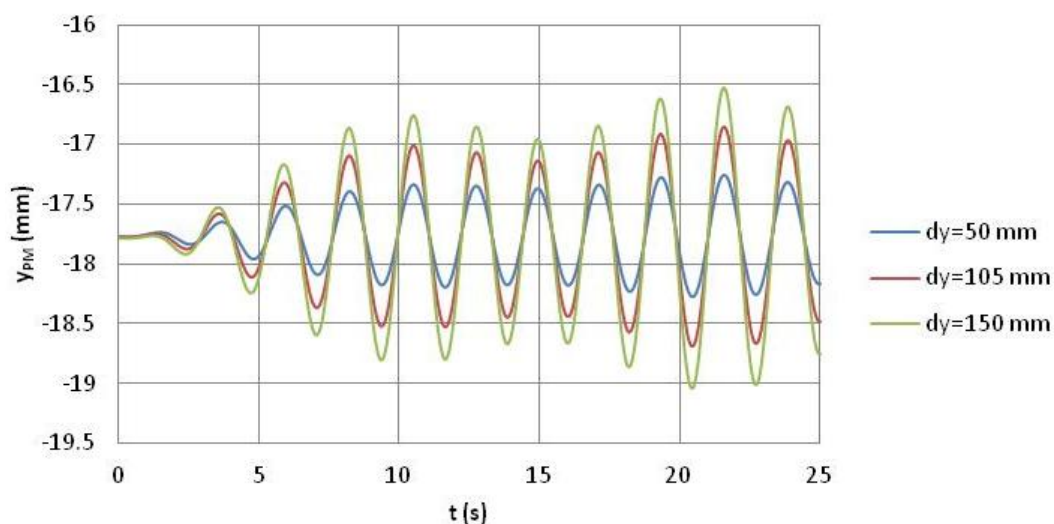
Gráfica 6.89: Giro en y de la carga suspendida (θ_y) en función del parámetro d_x y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), con $d_A=1195$ mm y $d_y=50$ mm

- Efecto de variar d_y

La variación del parámetro d_y no tiene prácticamente ningún efecto en el comportamiento del sistema, salvo para el caso 2 (carga descentrada en $+y$), en el que un aumento en el valor del citado parámetro conlleva en empeoramiento en el comportamiento de la carga suspendida con respecto al giro en x y al desplazamiento en y , como se puede observar en las **Gráficas 6.90 y 6.91**.



Gráfica 6.90: Giro en x de la carga suspendida (θ_x) en función del parámetro d_y y del tiempo para el caso 2 (carga descentrada en $+y$), con $d_A=1045$ mm y $d_x=0$ mm



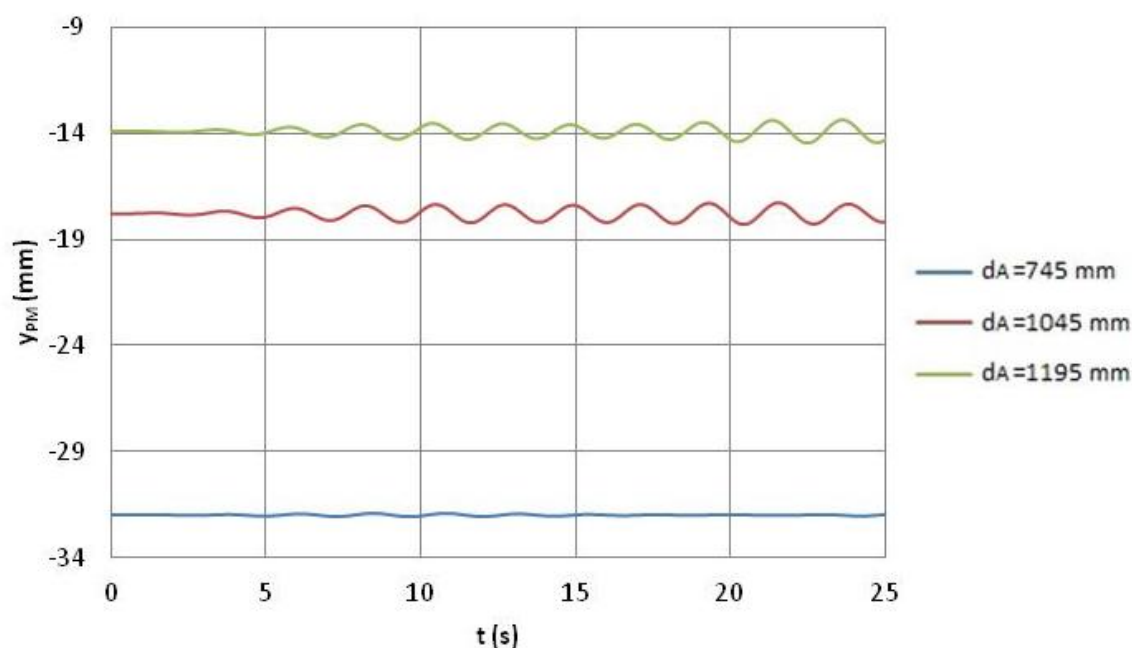
Gráfica 6.91: Desplazamiento en y de la carga suspendida (y_{PM}) en función del parámetro d_y y del tiempo para el caso 2 (carga descentrada en $+y$), con $d_A=1045$ mm y $d_x=0$ mm

Siguiendo con el caso 2, aunque existe cambio en los valores de las variables mencionadas, las tensiones en los cables se mantienen prácticamente iguales.

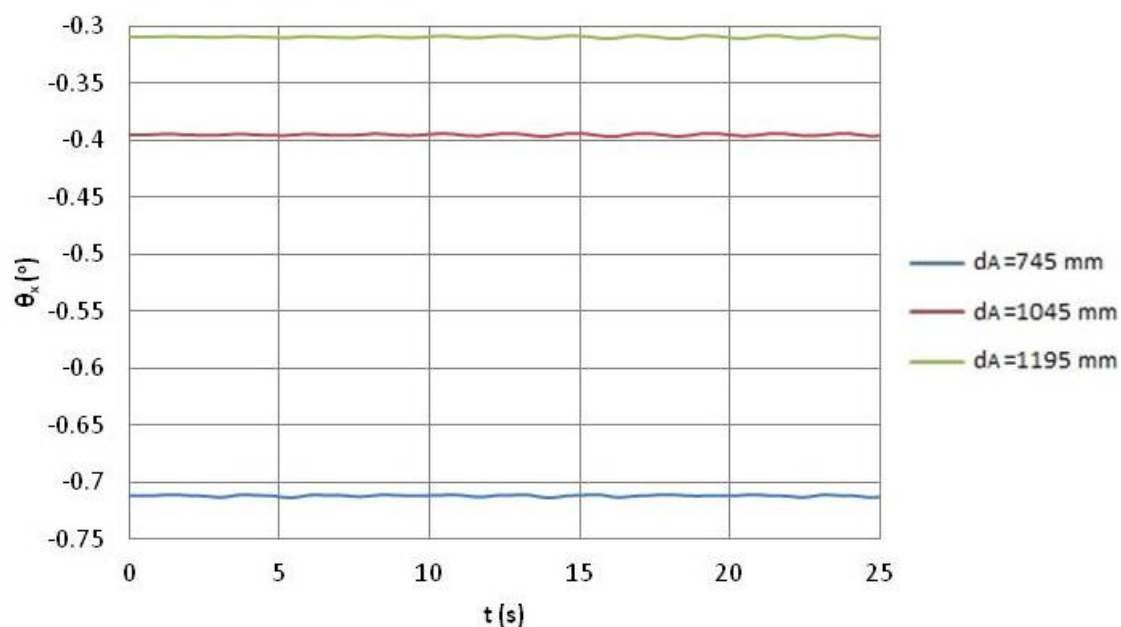
- Efecto de varia d_A

Variar d_A , únicamente tiene efecto si la carga se encuentra descentrada en y , apreciándose sobre todo dicho efecto en el desplazamiento en y , en el giro en x y en el giro en z de la carga suspendida.

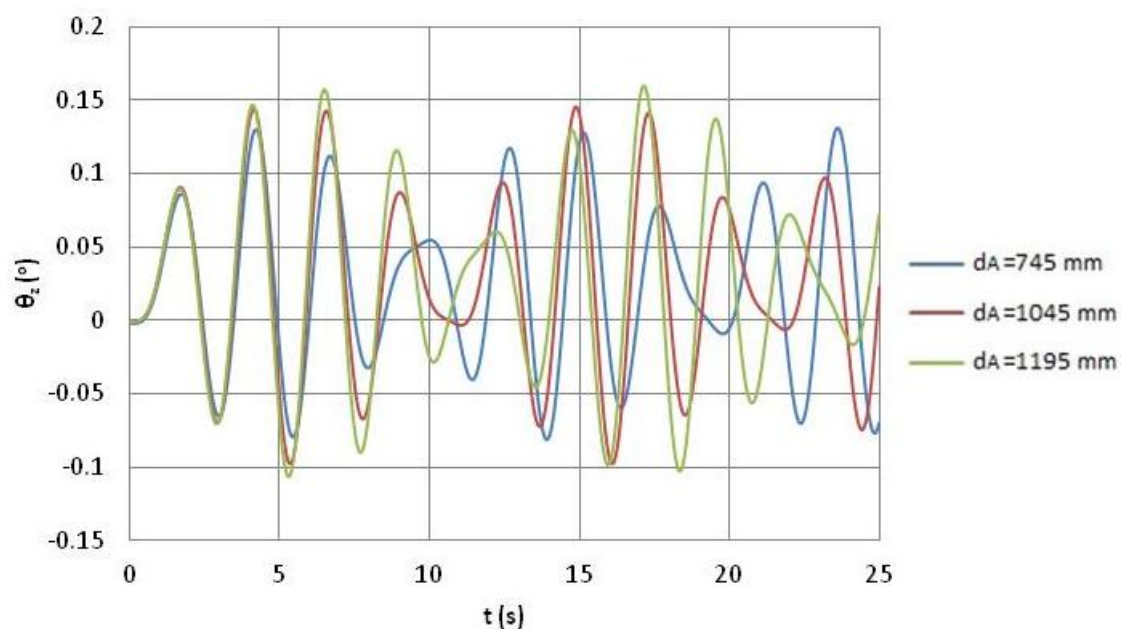
Cuando la carga únicamente está descentrada en y , un aumento del valor de d_A supone una mejora significativa en la posición inicial de la carga suspendida en relación al desplazamiento en y y al giro en x (el giro inicial en z se mantiene más o menos constante). Sin embargo, dicho aumento en d_A , produce un empeoramiento en la amplitud en las curvas de las variables antes mencionadas (también del giro en z). Para ver esto con mayor claridad, podemos acudir a las **Gráficas 6.92, 6.93 y 6.94.**



Gráfica 6.92: Desplazamiento en y de la carga suspendida (y_{PM}) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 2 (carga descentrada en $+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm

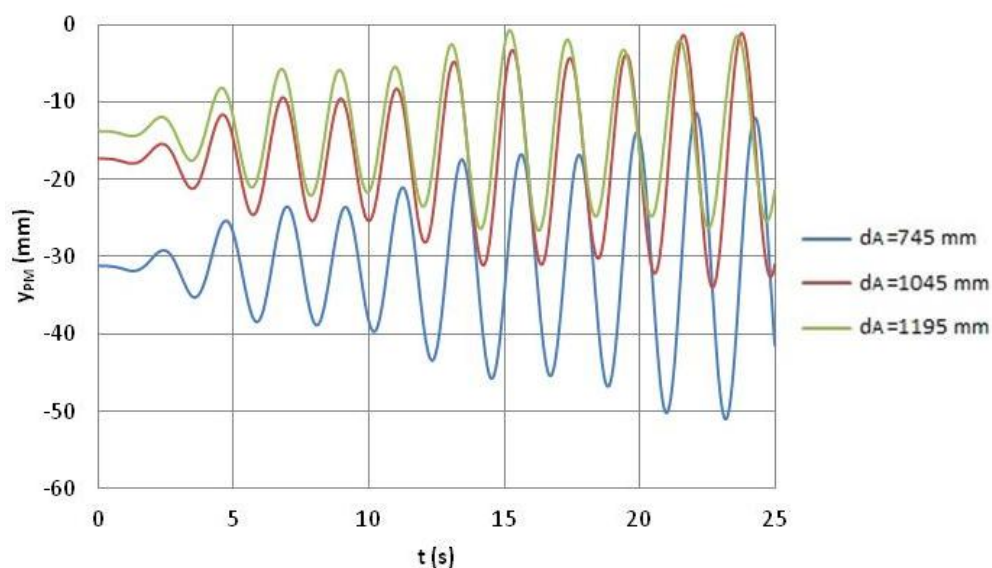


Gráfica 6.93: Giro en x de la carga suspendida (θ_x) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 2 (carga descentrada en $+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm

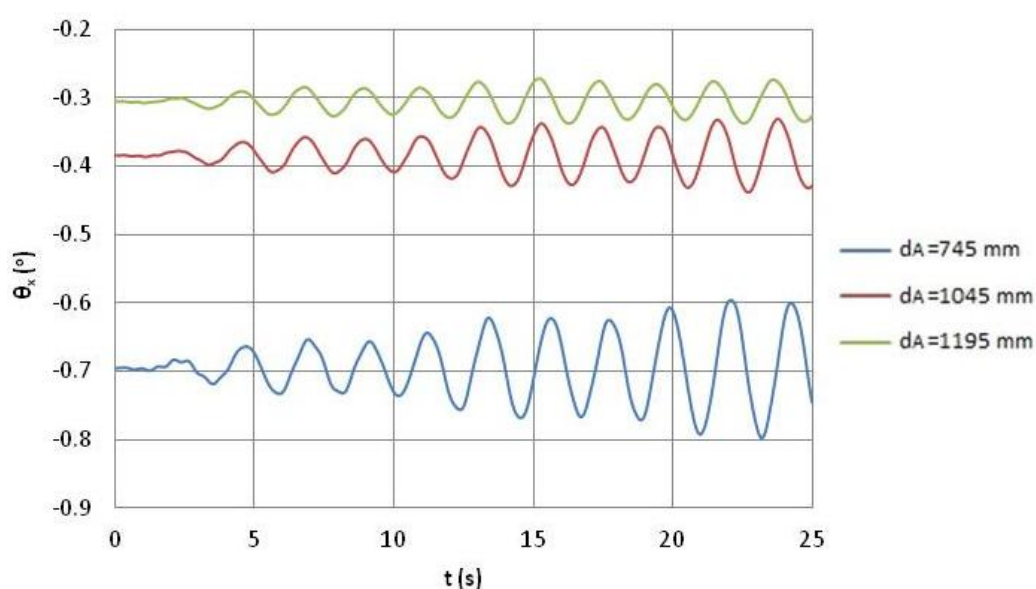


Gráfica 6.94: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 2 (carga descentrada en $+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm

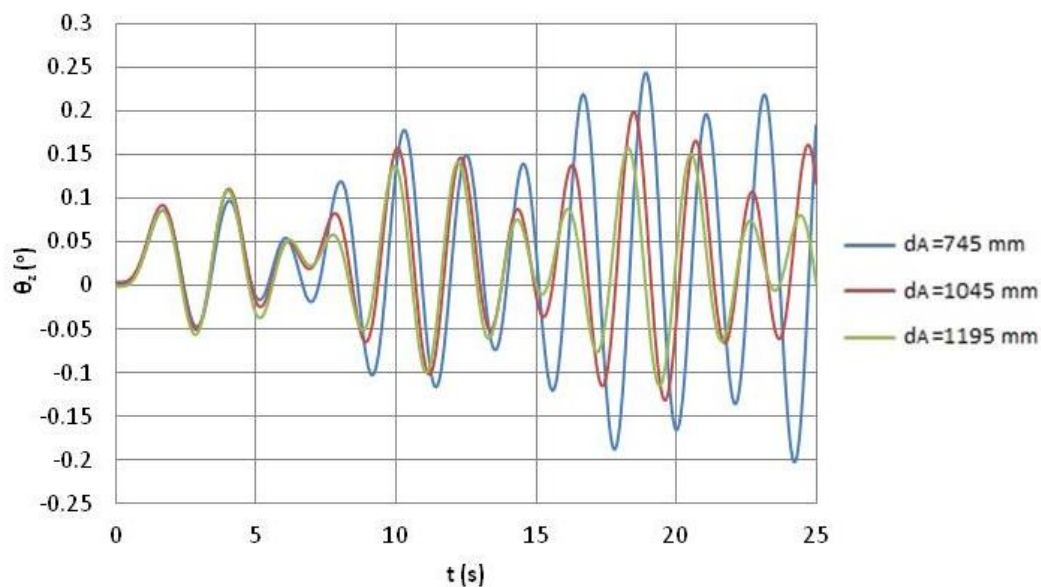
Aparte, cuando la carga se encuentra descentrada en x e y , aumentar el valor de d_A supone una mejora importante en cuanto al desplazamiento en y , al giro en x y al giro en z tanto en posición inicial (excepto para el giro en z que mantiene una posición inicial prácticamente constante) como en la amplitud del movimiento. Para comprobar esto, podemos consultar las Gráficas 6.95, 6.96 y 6.97, para carga descentrada en $+x+y$.



Gráfica 6.95: Desplazamiento en y de la carga suspendida (y_{PM}) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm



Gráfica 6.96: Giro en x de la carga suspendida (θ_x) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm



Gráfica 6.97: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función del parámetro d_A y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en +x+y), con $d_x=0$ mm y $d_y=50$ mm

En cuanto a las tensiones en los cables, la variación de d_A afecta a prácticamente los 8 cables que tiene el modelo.

2.1.3 RESUMEN

En las **Tablas 6.10 y 6.11**, podemos observar que variables del movimiento se ven afectadas por la modificación de los parámetros d_x , d_y y d_A cuando aplicamos aceleración al sistema en la dirección del carro o en la del pórtico respectivamente.

	Mejora	Empeora
$\uparrow d_x$	x_{PM}	_____
$\uparrow d_y$	_____	θ_z y x_{PM} en el caso 1
$\uparrow d_A$	θ_x e $y_{carro}-y_{PM}$	x_{PM}

Tabla 6.10: Variables que mejoran o empeoran al aumentar el valor de los parámetros d_x , d_y y d_A utilizados en la primera parte de las simulaciones en 3D aplicando aceleración al sistema en la dirección del carro

	Mejora	Empeora
$\uparrow d_x$	θ_y	
$\uparrow d_y$		θ_x e y_{PM}
$\uparrow d_A$	<p>Posición inicial de θ_x e y_{PM} en el caso de carga descentrada en $+y$</p> <p>Posición inicial y amplitud de θ_x, θ_z e y_{PM} cuando la carga está descentrada en x e y</p>	Amplitud de θ_x , θ_z e y_{PM} en el caso de carga descentrada en $+y$ (aunque poco comparado con las mejoras)

Tabla 6.11: Variables que mejoran o empeoran al aumentar el valor de los parámetros d_x , d_y y d_A utilizados en la primera parte de las simulaciones en 3D aplicando aceleración al sistema en la dirección del pórtico

Podemos decir, que **utilizar un valor relativamente alto del parámetro d_x sería beneficioso para el comportamiento del sistema**, puesto que supone algunas mejoras en ciertas variables de movimiento de la carga suspendida, tanto con aceleración en la dirección del carro como con aceleración en la dirección del pórtico.

Pasamos a hablar del parámetro d_y . Cuando tenemos aceleración en la dirección del carro, la no simetría de ciertas poleas situadas en el mismo, de la cual ya hemos hablado en otras ocasiones, hace que obtengamos ciertos movimientos residuales (como el giro en z o el desplazamiento en x) cuando tenemos carga centrada. Dichos movimientos son mayores cuanto más grande es el valor de d_y . Aparte, cuando aplicamos aceleración al sistema en la dirección del pórtico, un aumento del valor del citado parámetro supone un empeoramiento del giro en x y del desplazamiento en y de la carga suspendida.

Visto esto, y observando que **minimizar el valor de d_y no supone que las variables del sistema empeoren apreciablemente en ningún caso, podemos decir que convendría utilizar un valor lo más pequeño posible en dicho parámetro.**

En cuanto al parámetro d_A , cuando tenemos aceleración en la dirección del carro, aumentar el valor de este parámetro, nos mejora el movimiento correspondiente al balanceo principal de la carga suspendida. Sin embargo, se empeora más o menos en la misma proporción otra variable como es el desplazamiento en x . Por otra parte, cuando tenemos aceleración en la dirección del pórtico, parece que utilizar un valor relativamente alto del parámetro d_A nos proporcionará, de forma general, una mejora en el comportamiento del sistema en algunos casos.

Con todo esto, podríamos decir que **elegiríamos utilizar un valor relativamente grande del parámetro d_A** , algo que, en un principio, nos proporcionaría más ventajas que inconvenientes. Sin embargo, el valor de dicho parámetro no debería ser excesivamente grande, para no permitir que el desplazamiento en x de la carga suspendida se nos disparase cuando aplicamos aceleración en la dirección del carro.

2.2 SIMULACIONES CON INDUCCIÓN DE SKEW EN LA CARGA SUSPENDIDA

Recordamos que, para estas simulaciones, utilizaremos unos valores de los parámetros d_x , d_y y d_A constantes, los cuales serán iguales a 0 mm, 105 mm y 1195 mm respectivamente. Utilizaremos además los mismos casos de distribución de la carga que usamos en el punto anterior, para así poder comparar valores de tensiones, giros, etc.

Haremos uso del parámetro denominado δ , que nos permitirá realizar el *skew* en la carga suspendida. En la **Figura 6.153**, podemos observar mejor cómo quedan los anclajes de los cables al carro y al cambio rápido, así como la dirección y sentido del desplazamiento δ que se realizará en alguno de ellos.

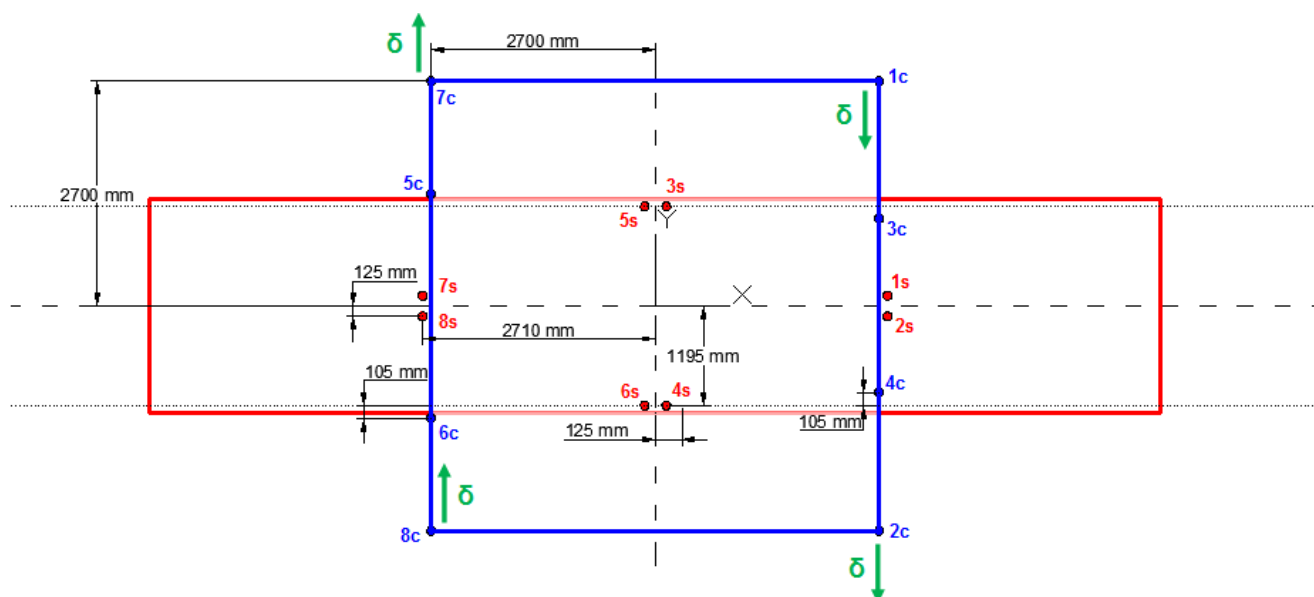
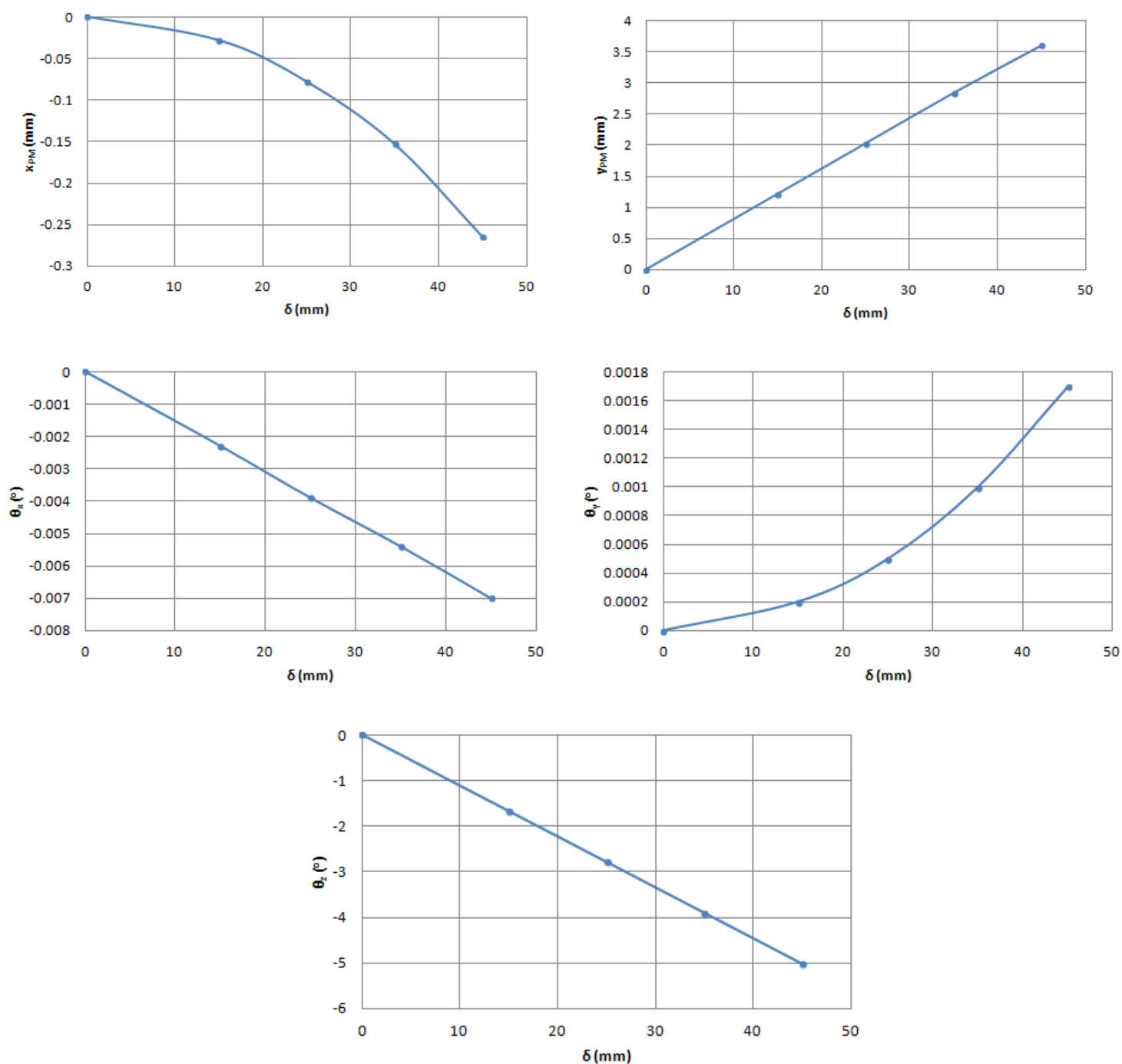


Figura 6.153: Vista en planta del sistema para la visualización de los amarres de los cables y el desplazamiento δ para realizar *skew* en la carga suspendida

2.2.1 SIMULACIONES EN RÉGIMEN ESTÁTICO



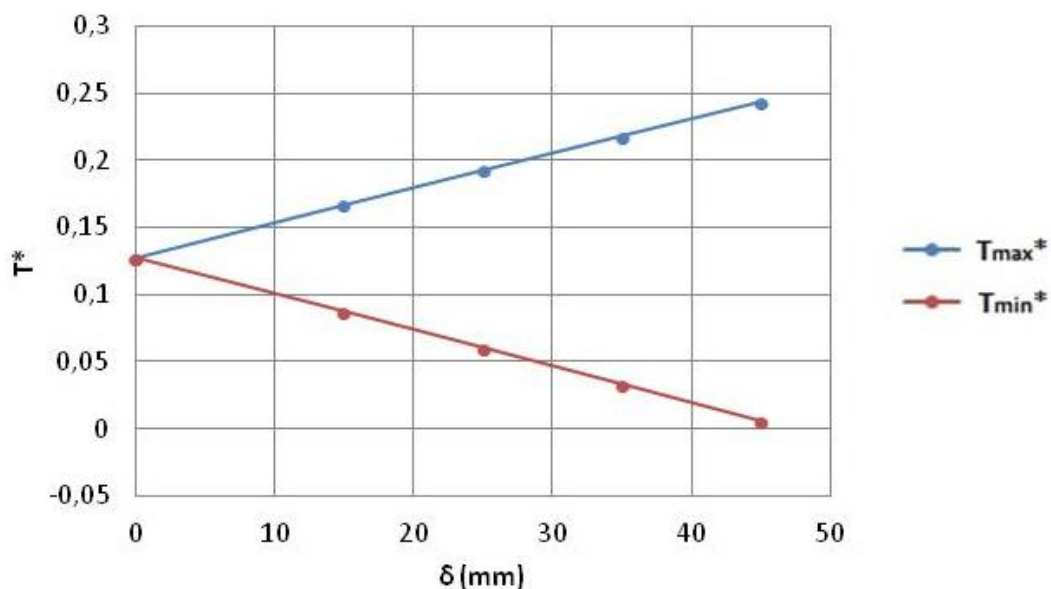
Gráficas 6.98: De arriba abajo y de izquierda a derecha: gráfico de desplazamiento en x (x_{PM}), desplazamiento en y (y_{PM}), giro en x (θ_x), giro en y (θ_y) y giro en z (θ_z) en función del parámetro δ para el caso 1 de distribución de la carga (carga centrada) y en régimen estático.

Como ya se señaló en el Capítulo 3, comenzaremos este apartado realizando una serie de simulaciones en estático, con el caso de carga centrada, dando valores al parámetro δ hasta conseguir un giro en *skew* (giro en z) de la carga suspendida de alrededor de 3° . Los resultados de dichas simulaciones en relación a los desplazamientos y giros de la carga suspendida, se muestran en las **Gráficas 6.98**.

En dichas gráficas, podemos observar que inducir un giro en *skew* en la carga suspendida conlleva la modificación o aparición (dependiendo de la distribución de la carga) de otra serie de variables de movimiento distintas a cuando la carga no se encontraba girada.

El valor de δ para el cual obtenemos un giro en *skew* igual a 3° , se encuentra en torno a 25 mm para la altura de suspensión para la que realizamos las simulaciones. Este es el valor de δ que utilizaremos más adelante, en este punto, cuando induzcamos aceleración al sistema.

En cuanto a las tensiones, girar la carga hace que las diferencias entre los valores de tensión en los cables se acrecienten, apreciándose una mayor distancia entre la tensión máxima y la mínima obtenida en el conjunto de cables. En la **Gráfica 6.99** podemos ver cuáles son las tensiones máximas y mínimas obtenidas en régimen estático en función de δ .



Gráfica 6.99: Gráfico de tensión mínima (T_{min}^*) y máxima (T_{max}^*) adimensionales en función del parámetro δ para el caso 1 de distribución de la carga (carga centrada) y régimen estático

El hecho de que al realizar *skew* en la carga nos encontremos mayores diferencias entre tensiones máximas y mínimas, significa que será más probable que haya cables que no trabajen o que trabajen en exceso cuando realizamos giros en el contenedor, cuando se induzca además aceleración en el sistema.

2.2.2 SIMULACIONES EN RÉGIMEN DINÁMICO

Recordamos de nuevo, que para estas simulaciones utilizaremos un valor $\delta = 25 \text{ mm}$, que es el que nos permite un giro en z de alrededor de 3° en la carga suspendida.

Como es natural, en las simulaciones realizadas en régimen dinámico, con *skew* en la carga suspendida, podemos apreciar algunas diferencias en los desplazamientos y giros de dicha carga con respecto a las simulaciones en las que no existía *skew*. Este hecho, es notable sobre todo en el caso en el que la carga está centrada. Podemos ver esto en el Anexo VII.

Sin embargo, nos centraremos más en las tensiones obtenidas en los cables, debido a que nos interesa más conocer si hay cables que no trabajan o que trabajan en exceso, ya que lo ideal sería que todos los cables del sistema trabajaran lo más equilibradamente posible. Empezaremos diciendo, que hay cables que aumentan sus valores de tensión al realizar *skew* en la carga, con la dirección del giro escogida, y otros en los que los valores de tensión disminuyen.

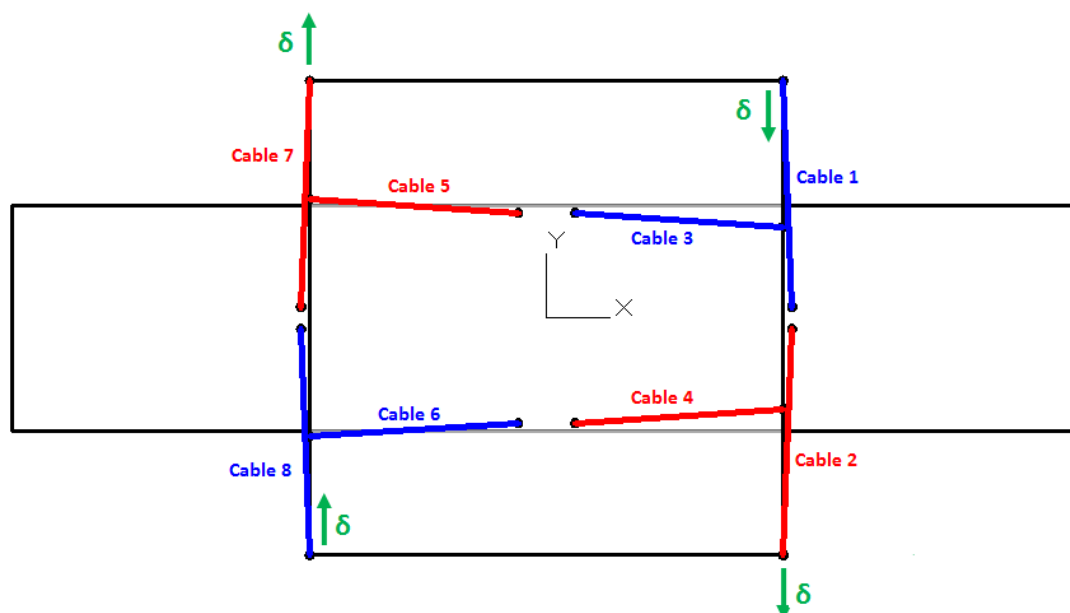
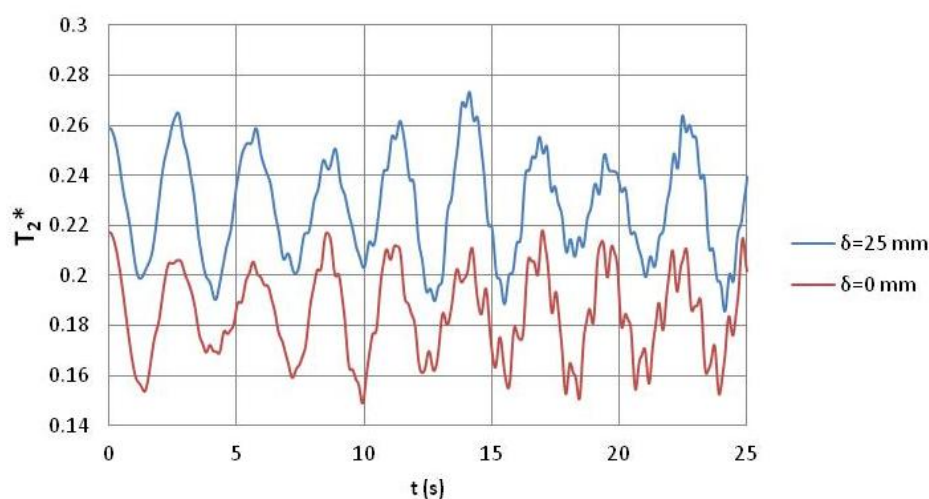
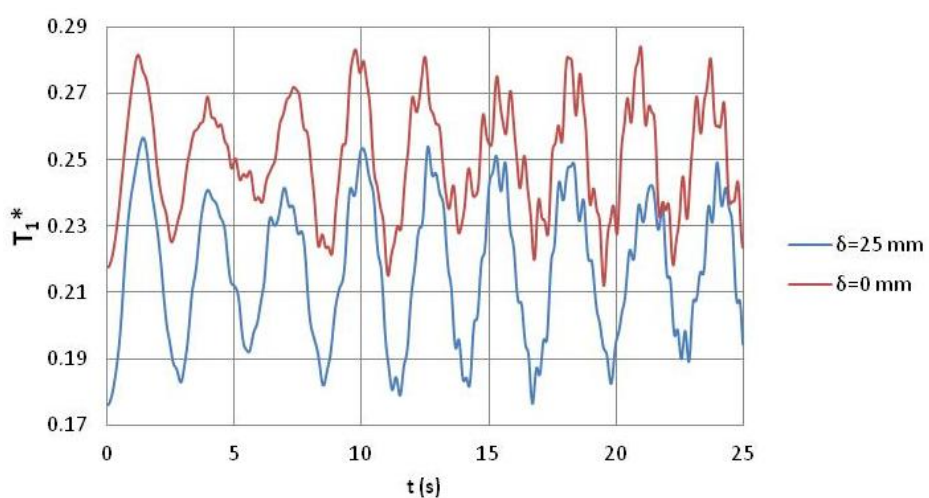
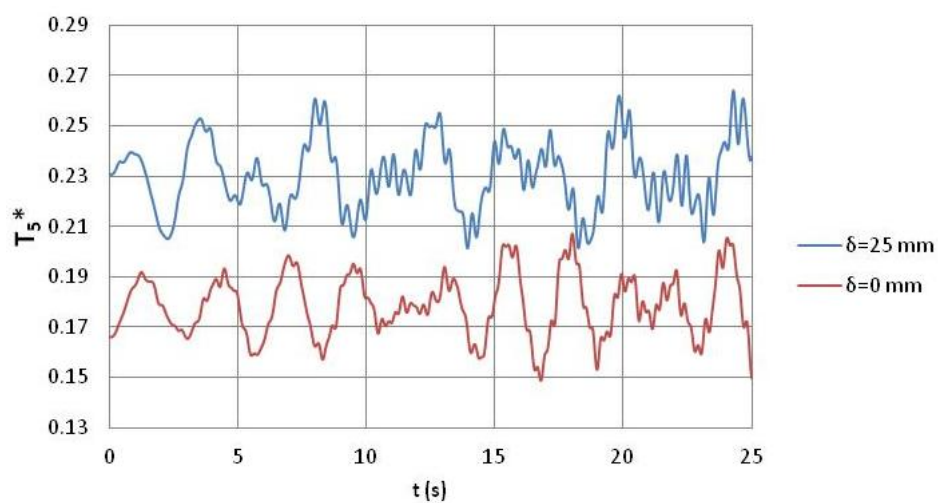
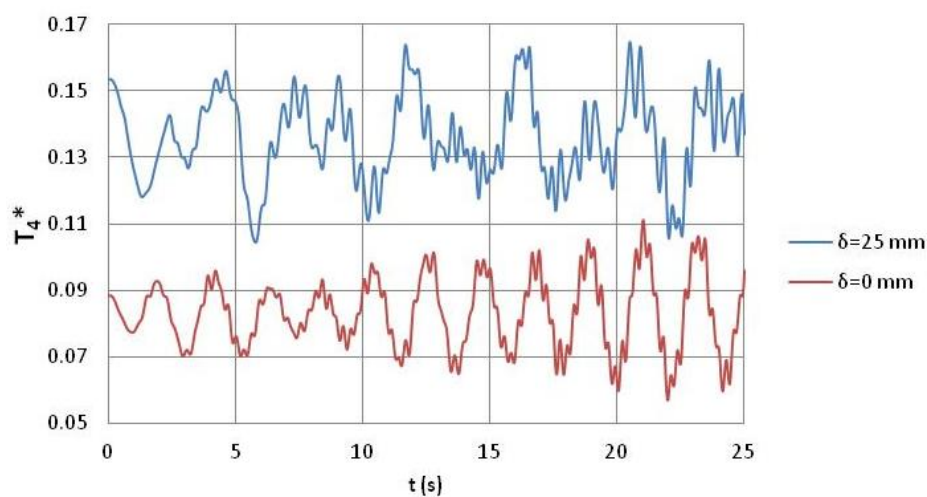
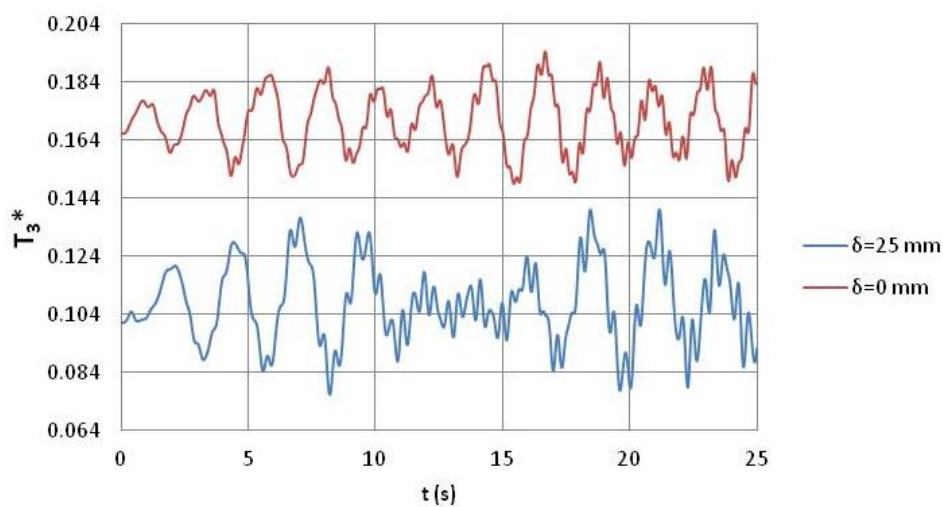
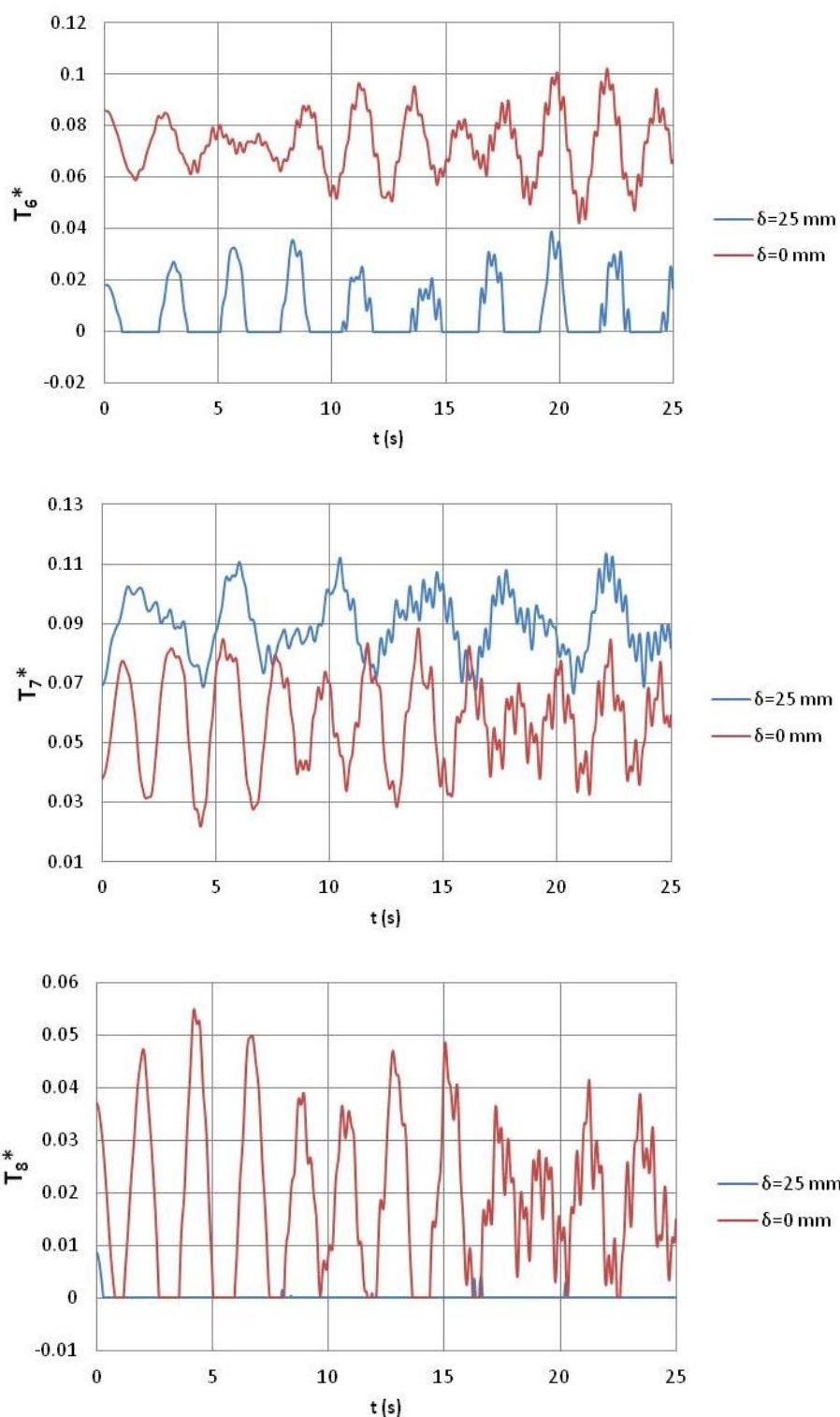


Figura 6.154: Vista en planta del sistema con los cables que aumentan su tensión (en rojo) y con los que disminuyen su tensión (en azul) al realizar *skew* en la carga suspendida

Como se puede ver en la **Figura 6.154**, los cables en los que aumentan los valores de tensión al realizar el giro son los cables 2, 4, 5 y 7, mientras que en los cables restantes (cables 1, 3, 6 y 8), los valores de tensión disminuyen al realizar el citado giro en la carga suspendida. En el conjunto de **Gráficas 6.100**, que se muestran a continuación, podemos ver un ejemplo de cuanto aumentan o disminuyen las tensiones en los cables al realizar *skew*. Para ello, utilizaremos el caso de carga descentrada en +x+y, con aceleración en la dirección del carro.







Gráficas 6.100: De arriba a abajo, tensión adimensional en los cables 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 en función de δ y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$) y aceleración en dirección del carro.

En el conjunto de de **Gráficas 6.100**, podemos comprobar cómo al realizar *skew* en un determinado sentido, hay cables que pueden dejar de trabajar, como es el caso del cable 6 o el 8. También podrían aparecer cables que trabajaran en exceso, como es el caso del cable 1 si el giro en *skew* se hubiese realizado en sentido contrario, ya que, aunque ya está bastante tensionado, posiblemente sobrepasaría el valor de 0,3 en términos de tensión adimensional.

Hay que señalar, que los valores de tensión adimensional máximos encontrados en estas simulaciones, rondan el 0,29, parecidos a los encontrados en las simulaciones en las que no se realizó *skew*. Sin embargo, pensamos que podríamos encontrar valores superiores de tensión, aunque aparentemente no mucho más superiores, si se realizasen más simulaciones cambiando el sentido de giro en *skew* del sistema (como hemos visto en el caso anterior con el cable 1). No nos detendremos en ello en este proyecto, debido a la gran cantidad de tiempo necesaria para realizar estas simulaciones y a que, con lo ya simulado, tenemos información suficiente.

2.3 INTRODUCCIÓN DE YUGO EN LOS ANCLAJES DE CIERTOS CABLES AL CAMBIO RÁPIDO

Debido a que en las simulaciones realizadas hasta ahora, se observan casos en los que hay grandes diferencias entre las tensiones de los distintos cables, habiendo incluso cables que por momentos dejan de estar tensionados, probaremos a colocar un yugo en los anclajes de los cables 3-5 y 6-4 al cambio rápido, de la forma que se explicó en el Capítulo 3.

Dicho yugo, en un principio, servirá para equilibrar algo más las tensiones existentes en el sistema, sobre todo la de las parejas de cables antes mencionadas. Esto se debe a que, al girar el citado elemento, lo que se produce es un acortamiento de uno de los cables que está anclado al yugo y un alargamiento del otro.

Sin embargo, introducir un yugo en el sistema también podría tener un efecto negativo en cuanto a los desplazamientos y giros de la carga suspendida, ya que, previsiblemente, nos encontraríamos con un sistema menos rígido del que teníamos inicialmente.

Recordamos que el yugo que introduciremos tendrá forma de triángulo equilátero, con las dimensiones que se muestran en la **Figura 6.155**. Dicho yugo, se colocará en el anclaje al cambio rápido de los cables 3-5 y 6-4 de la forma que se muestra en la **Figura 6.156**.

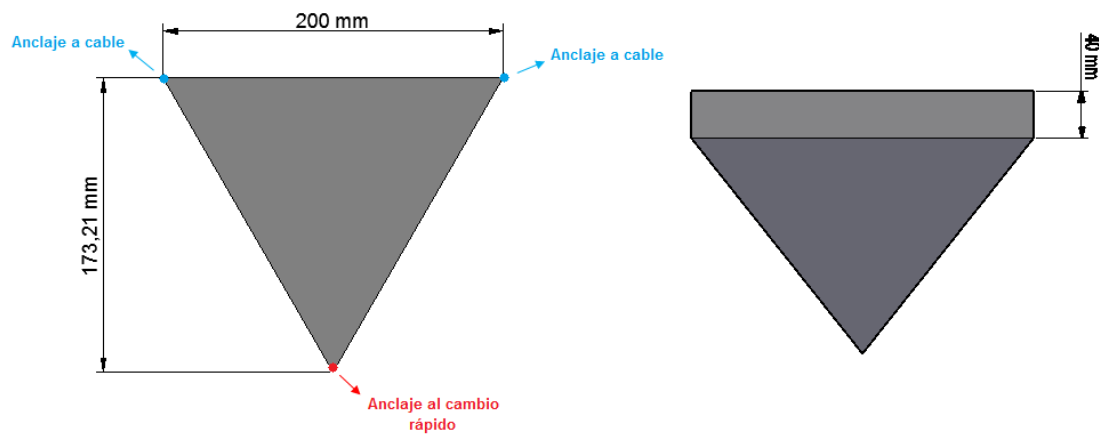


Figura 6.155: Dimensiones del yugo introducido en el modelo 3D

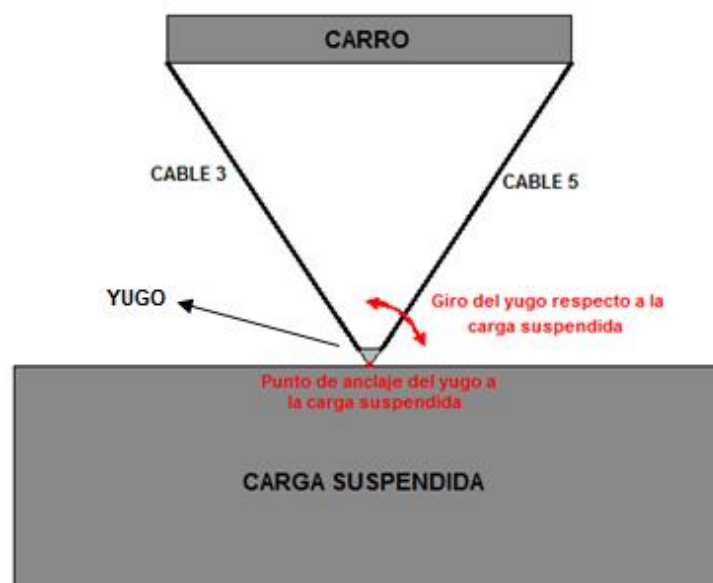


Figura 6.156: Introducción del yugo dentro del modelo

Aparte, como ya se explicó en el Capítulo 3, hay que introducir un suplemento en el modelo en los anclajes 1-2 y 7-8 al cambio rápido, para que todos los anclajes de los cables a dicho elemento, queden a la misma altura. De esta forma, se mantendrá la configuración en *reeving*. Dichos suplementos tendrán la forma y dimensiones que se muestran en la **Figura 6.157**.

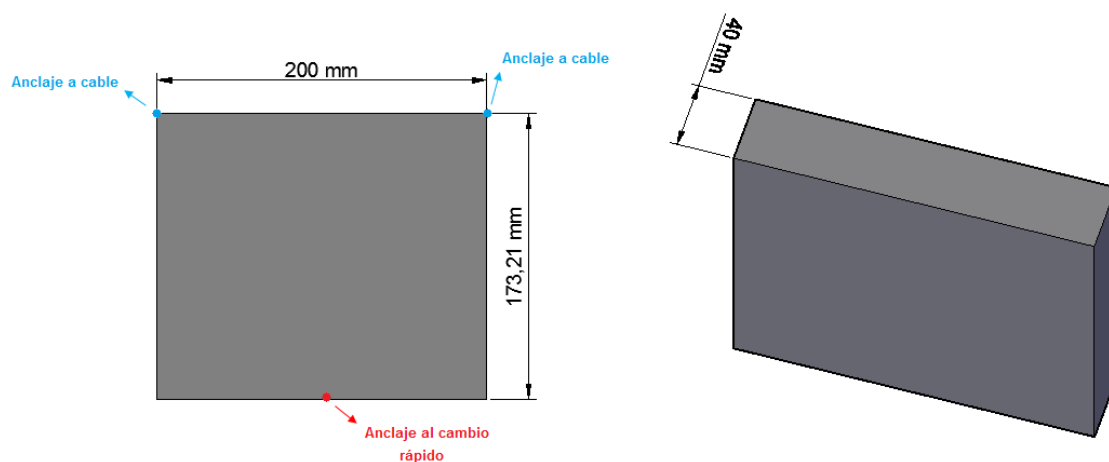


Figura 6.157: Dimensiones del suplemento para el modelo 3D con yugo

En la **Figura 6.158**, se puede observar cómo quedan los yugos y suplementos una vez son introducidos en el modelo en *Working Model 3D*.

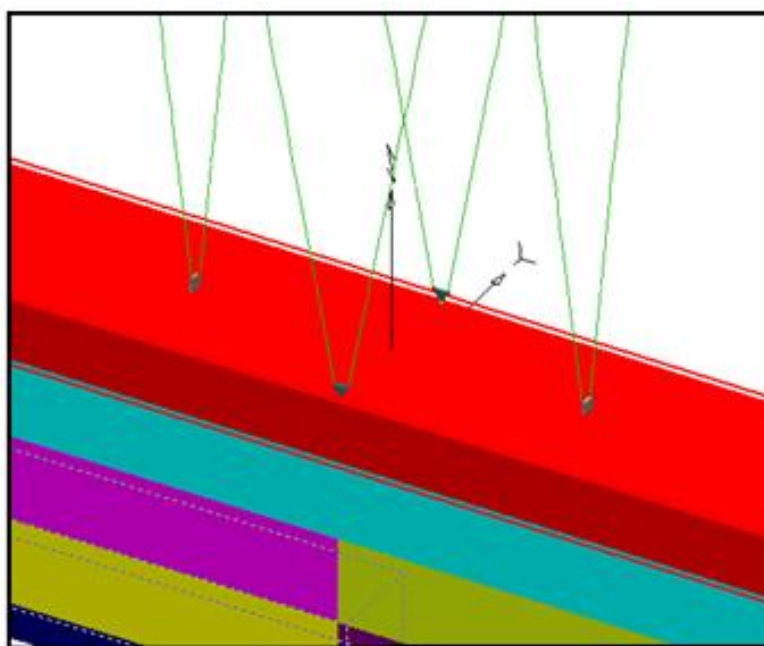


Figura 6.158: Vista de los yugos y los suplementos dentro del modelo en *Working Model 3D*

Hay que reseñar que en estas simulaciones, el cruzamiento, debido a las dimensiones del yugo, pasa a ser algo menor que en el resto de simulaciones en 3D. Su valor ahora será de 200

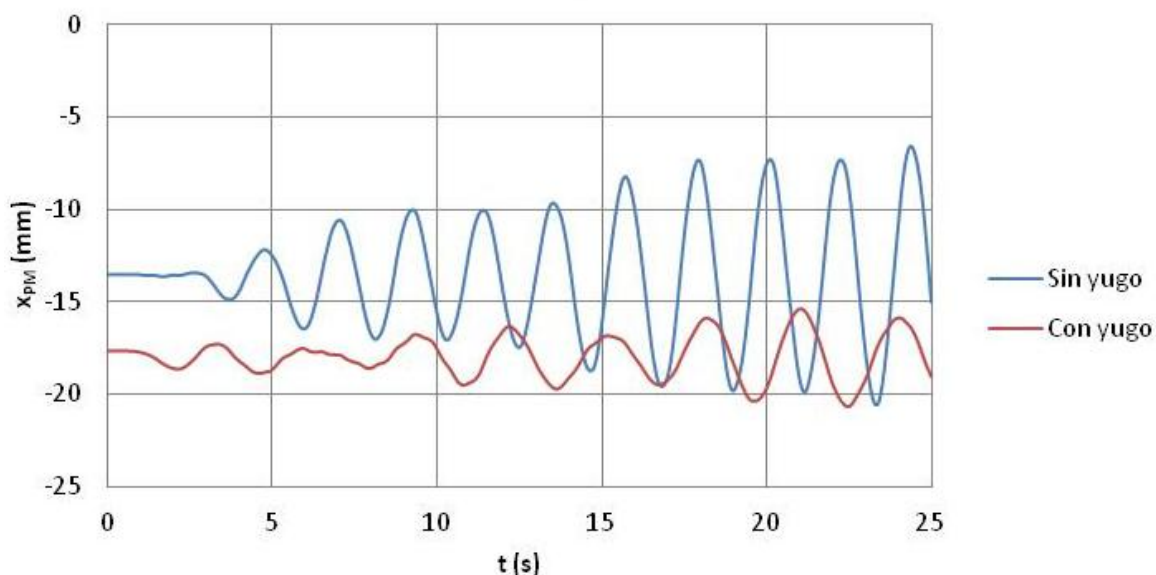
mm , algo que creemos que no resultará relevante. Los valores de los parámetros d_x , d_y y d_A , así como el de la altura de suspensión de la carga suspendida, seguirán siendo los mismos que para las simulaciones con inducción de *skew* en dicha carga.

Una vez dicho todo esto, pasamos a analizar el resultado de las simulaciones, separando entre simulaciones con aceleración en la dirección del carro y simulaciones con aceleración en la dirección del pórtico.

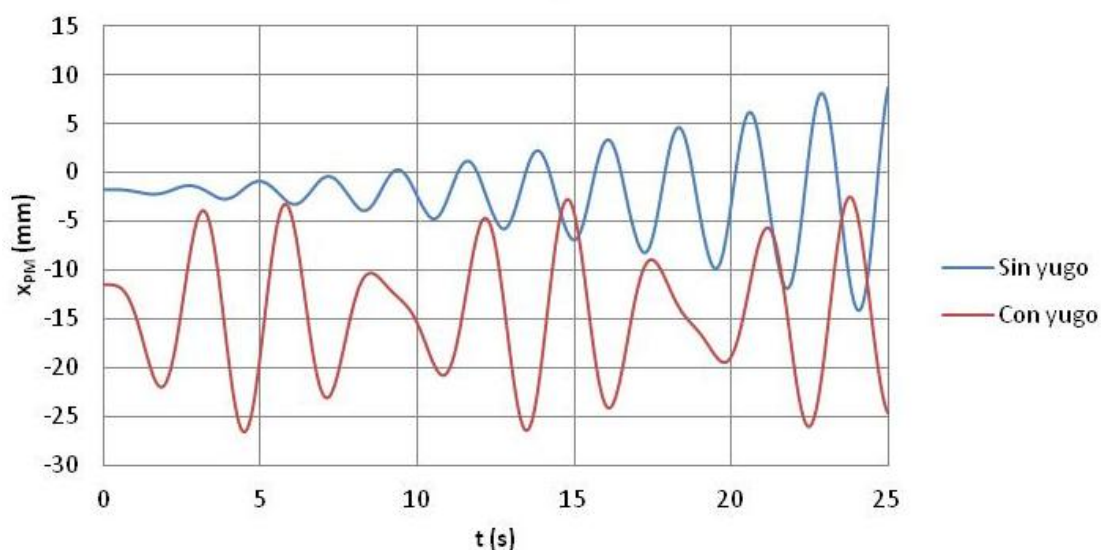
2.3.1 ACELERACIÓN EN LA DIRECCIÓN DEL CARRO

Si hablamos de movimientos, podemos decir que hay 3 variables que se ven especialmente afectadas por la introducción del yugo en el sistema. Éstas son el desplazamiento en x y los giros en z e y de la carga suspendida.

Comenzamos hablando de la variación del desplazamiento en x debido al yugo. Por lo general, tanto con la carga girada como sin girar en *skew*, dicha variable empeora en su posición inicial. Al mismo tiempo, cuando no tenemos *skew*, el desplazamiento en x mejora en cuanto a amplitud general del movimiento (salvo para el caso de carga centrada), sin embargo, cuando inducimos *skew*, la amplitud de dicha variable suele empeorar. Podemos ver algún ejemplo de lo explicado aquí en las **Gráficas 6.101 y 6.102**.

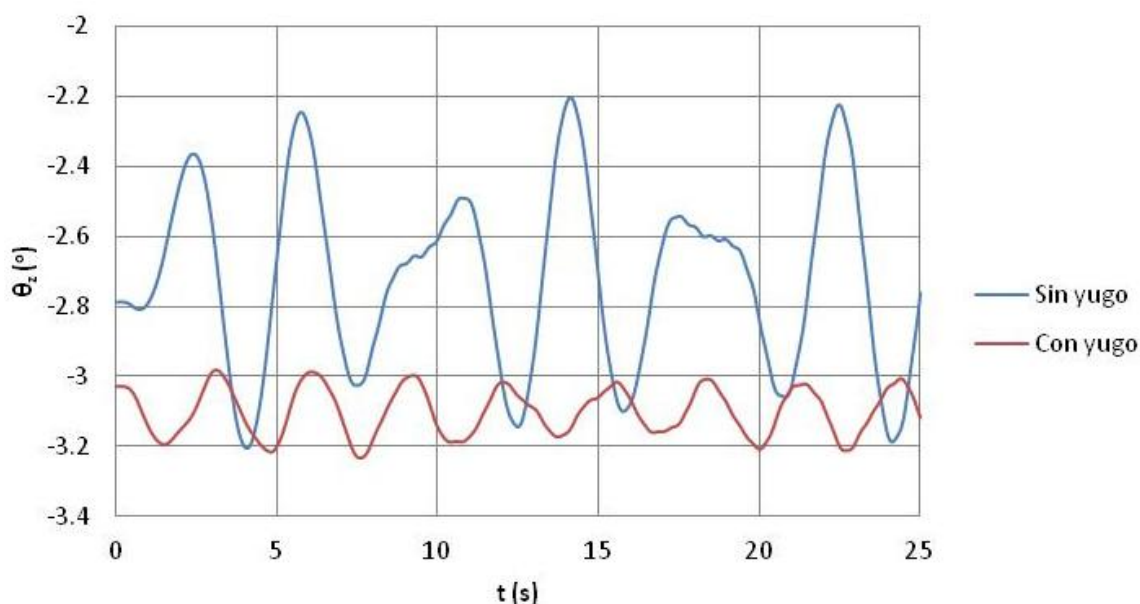


Gráfica 6.101: Desplazamiento en x de la carga suspendida (x_{PM}) en función de si el sistema existe o no yugo y del tiempo para el caso 4 (carga descentrada en $+x$) y $\delta=0\text{ mm}$

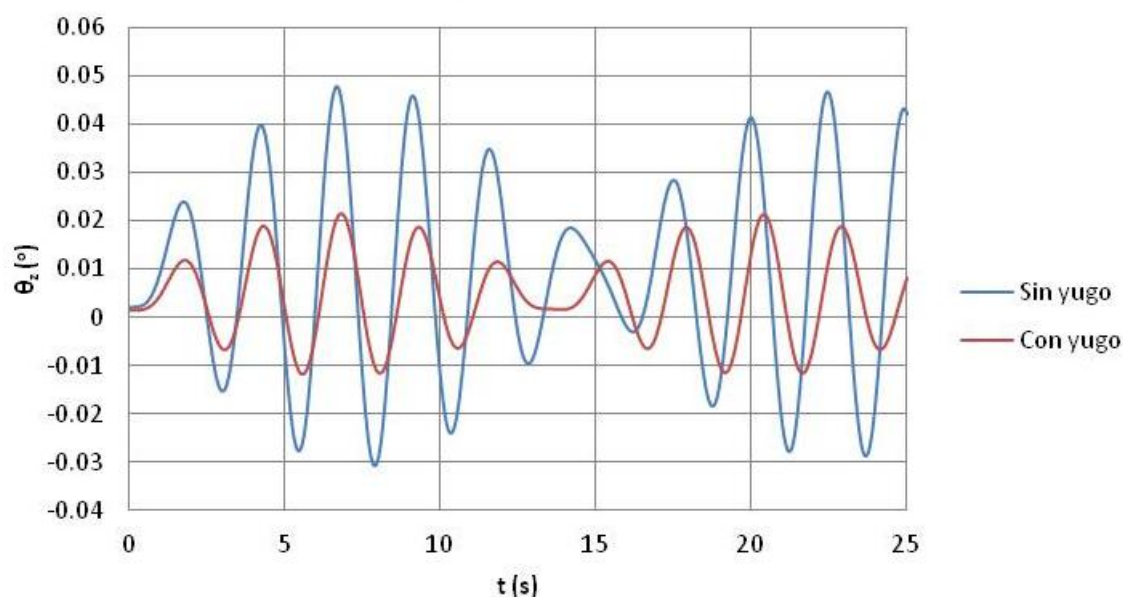


Gráfica 6.102: Desplazamiento en x de la carga suspendida (x_{PM}) en función de si en el sistema existe o no yugo y del tiempo para el caso 2 (carga descentrada en +y) y $\delta=25$ mm

Hablamos ahora del giro en z. La introducción del yugo hace que, de forma general, obtengamos un mayor giro en z cuando hablamos de posición inicial (en los casos en los que existe giro inicial en z), pero una menor amplitud de dicho giro, algo que podemos ver en la Gráficas 6.103 y 6.104.

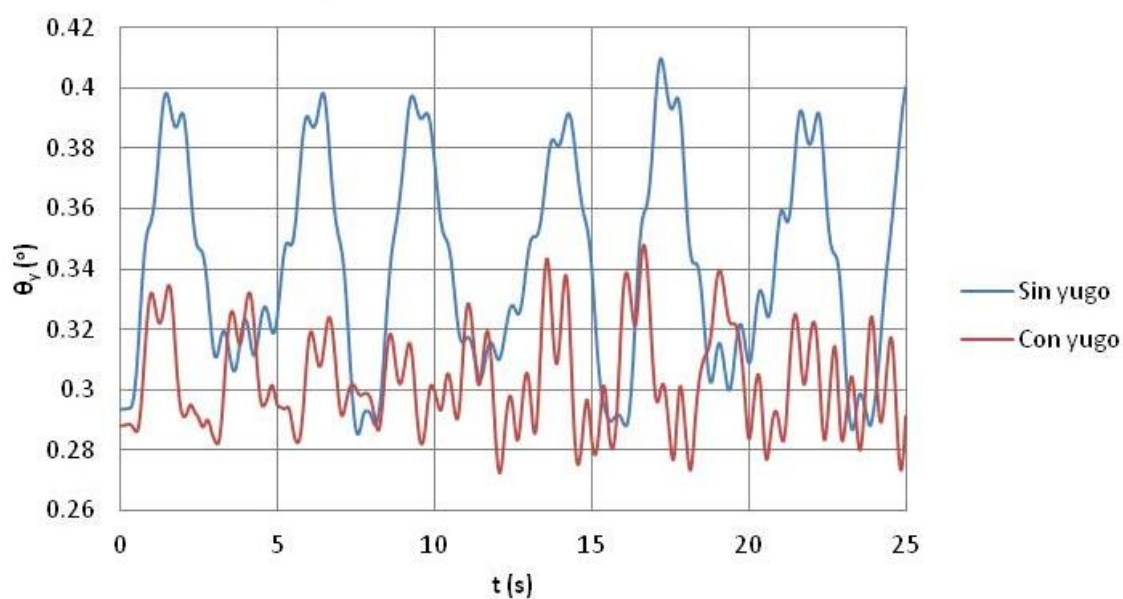


Gráfica 6.103: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función de si en el sistema existe o no yugo y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en +x+y) y $\delta=25$ mm

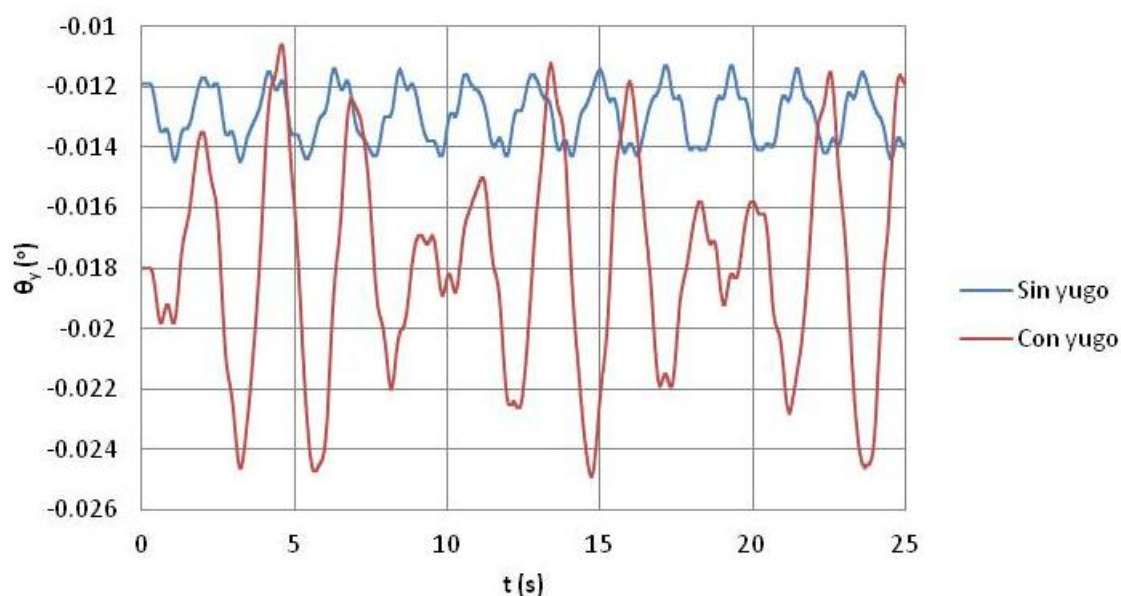


Gráfica 6.104: Giro en z de la carga suspendida (θ_z) en función de si en el sistema existe o no yugo y del tiempo para el caso 3 (carga descentrada en -y) y $\delta=0$ mm

En cuanto al giro en y, podemos afirmar que el efecto del yugo se hace notar sobre todo cuando la carga se encuentra girada en *skew*. En estas condiciones, cuando tenemos casos con carga descentrada en x, la introducción del yugo hace que empeoren los valores de dicho giro, mientras que cuando tenemos carga centrada o solamente descentrada en y, el yugo hace que el giro en y mejore. Podemos comprobar esto en las **Gráficas 6.105 y 6.106**.



Gráfica 6.105: Giro en y de la carga suspendida (θ_y) en función de si en el sistema existe o no yugo y del tiempo para el caso 7 (carga descentrada en +x-y) y $\delta=25$ mm

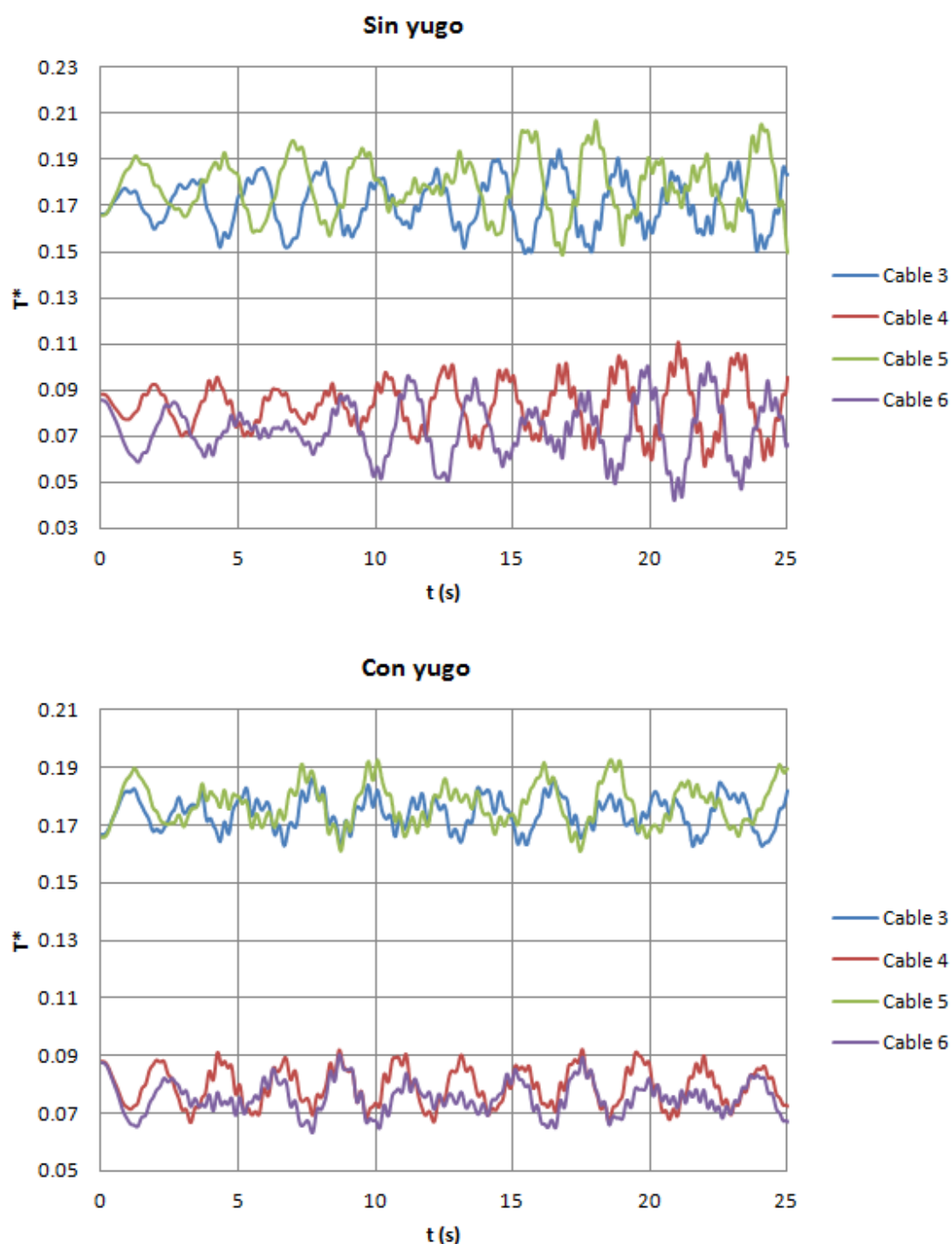


Gráfica 6.106: Giro en y de la carga suspendida (θ_y) en función de si en el sistema existe o no yugo y del tiempo para el caso 3 (carga descentrada en -y) y $\delta=25$ mm

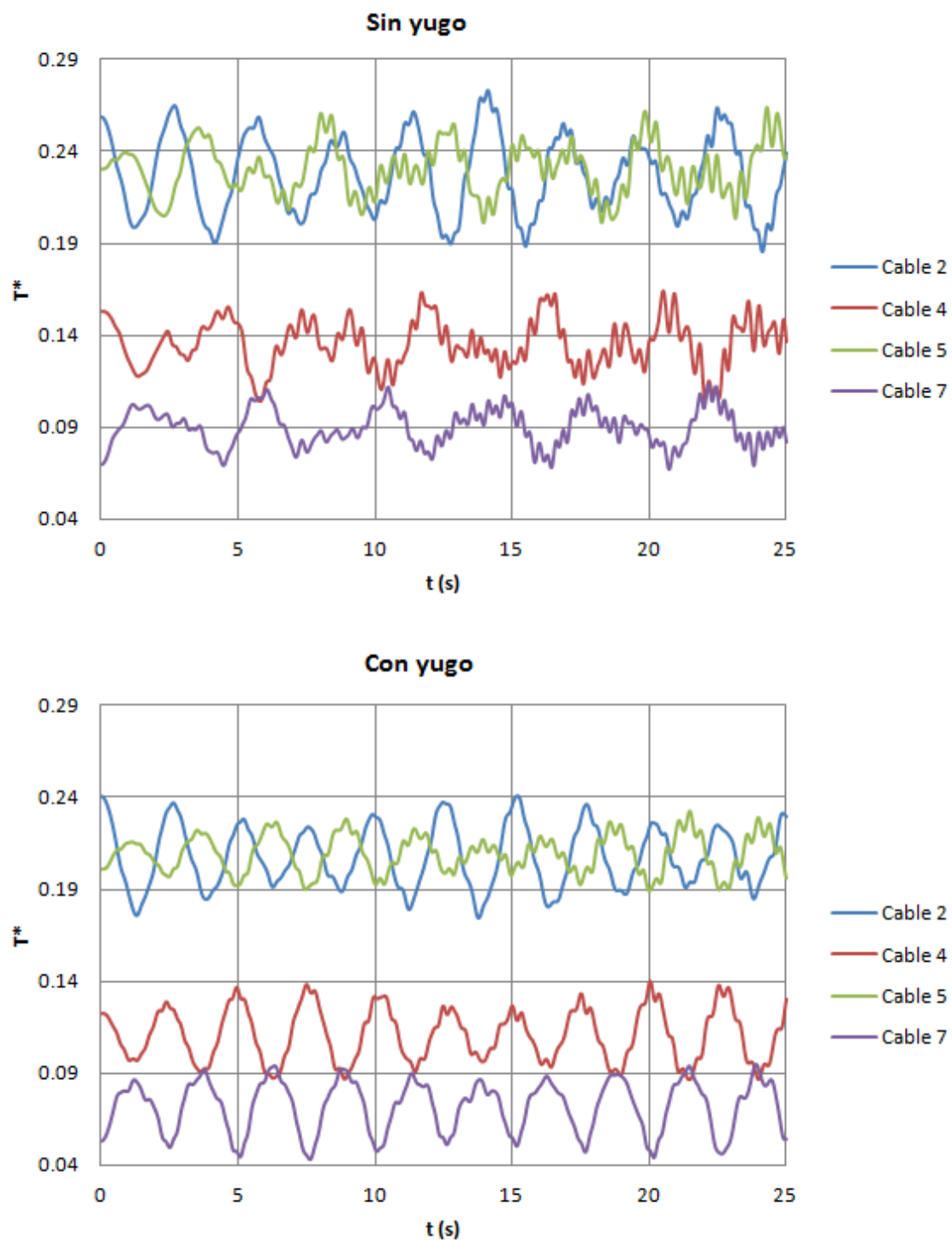
Hablamos ahora de tensiones. Para abordar correctamente este tema, debemos separar entre las simulaciones en las que existe *skew* en la carga suspendida y en las que no.

Cuando la carga suspendida no se encuentra girada en *skew*, lo que hace el yugo es intentar igualar, en la medida de lo posible, las tensiones del par de cables que están unidos al mismo. Hablamos en este caso de las parejas de cables 3-5 y 4-6. Podríamos decir que, en las condiciones en las que estamos, el alargamiento en régimen dinámico que se produce en estos cables viene dado, sobre todo, por el desplazamiento en x y el giro en y de la carga suspendida. Al ser bastante pequeñas las variaciones de estos movimientos en las simulaciones, también son pequeños los alargamientos de los citados cables, lo que hace que el yugo, con su movimiento de giro, sea capaz de igualar bastante las longitudes y por ende las tensiones entre 2 cables que se encuentran unidos al mismo yugo. Como ejemplo de esto se muestra la **Gráfica 6.107**. No se muestra variación reseñable en el resto de cables del sistema (cables 1, 2, 7 y 8) debido a la introducción del yugo.

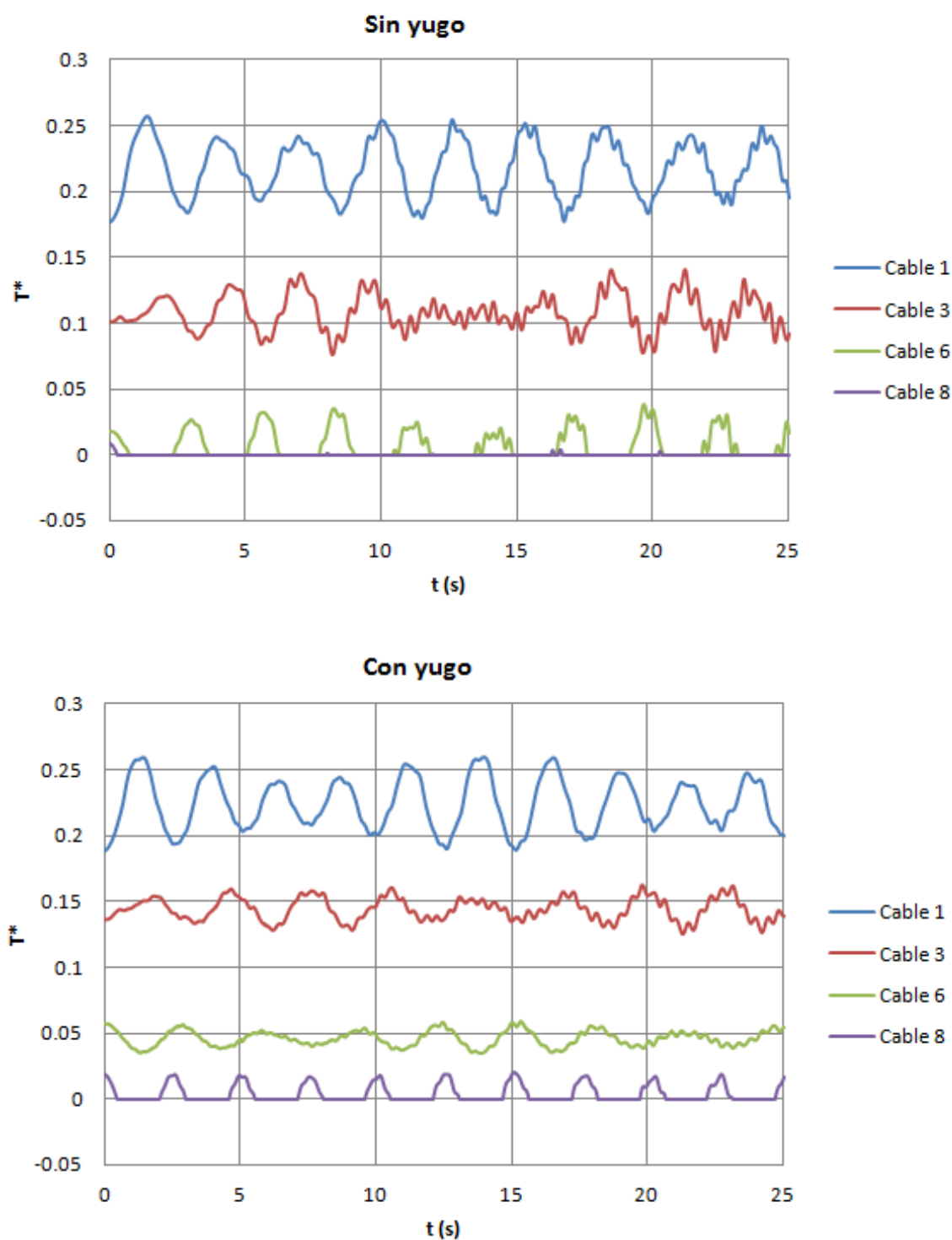
Recordemos que existían una serie de cables que sufrían un aumento en sus tensiones (cables 2, 4, 5 y 7) y otros en los que se producía un descenso de las mismas (cables 1, 3, 6 y 8) cuando inducíamos *skew* en la carga suspendida. Pues bien, cuando introducimos el yugo en el sistema, habiendo realizado *skew*, se produce un descenso en las tensiones de los cables que aumentaban su valor de tensión debido al *skew* y un aumento en los cables en los que se producía una disminución de tensión debida a dicho giro. Podemos ver un ejemplo de esto en las **Gráficas 6.108 y 6.109**.



Gráficas 6.107: Tensión adimensional (T^*) de los cables 3, 4, 5 y 6 en función del cable y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$) y $\delta=0$ mm, sin yugo en el sistema (arriba) o con yugo (abajo).



Gráficas 6.108: Tensión adimensional (T^*) de los cables que aumentan su tensión al realizar *skew* en la carga suspendida en función del cable y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$) y $\delta=25\text{ mm}$, sin yugo en el sistema (arriba) o con yugo (abajo).



Gráficas 6.109: Tensión adimensional (T^*) de los cables que disminuyen su tensión al realizar *skew* en la carga suspendida en función del cable y del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$) y $\delta=25\text{ mm}$, sin yugo en el sistema (arriba) o con yugo (abajo).

El hecho de que los cables del sistema se comporten de la manera que hemos expuesto anteriormente al introducir el yugo, hace que se reduzca, en cierta medida, el riesgo de que haya cables que dejen de trabajar o trabajen demasiado al girar la carga en *skew*. En ese sentido, el yugo podría ser una solución a tener en cuenta.

2.3.2 ACELERACIÓN EN LA DIRECCIÓN DEL PÓRTICO

Comenzamos hablando de movimientos. Claramente, hay 2 variables que se ven afectadas de forma negativa por la introducción del yugo en la mayor parte de casos de distribución de la carga e independientemente de que exista, o no *skew* (salvo para carga descentrada en $+x+y$ o $-x+y$ cuando tenemos *skew*). Éstas son el desplazamiento relativo en x y el giro en y . Podemos ver un ejemplos de esto en las **Gráficas 6.110**.

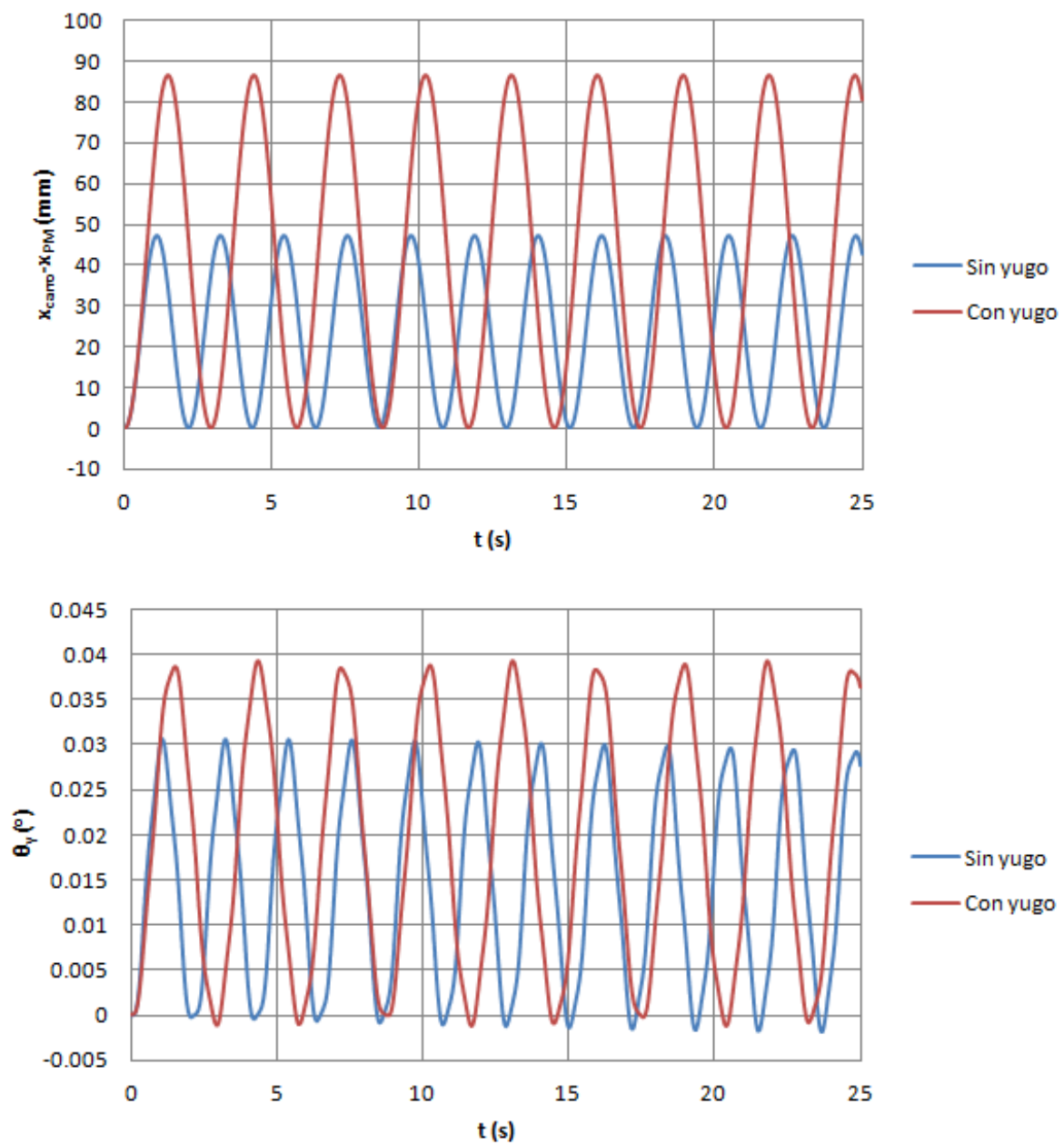
El resto de variables de movimiento, mejoran o empeoran al introducir el yugo dependiendo del caso de distribución de la carga y de la existencia de *skew*. No se observa un patrón claro.

Pasamos ahora a analizar las tensiones. En este caso, los movimientos que gobiernan en mayor medida el alargamiento en dinámico de los cables unidos al yugo, que son el desplazamiento en x y el giro en y , forman parte del balanceo principal de la carga suspendida, por lo que obtendremos valores elevados de las mismas. Este hecho, hace que el yugo no sea capaz de absorber la diferencia de alargamiento producido en las parejas de cables ancladas a él, por lo que, en un principio, su capacidad de igualar tensiones en los distintos cables mengua.

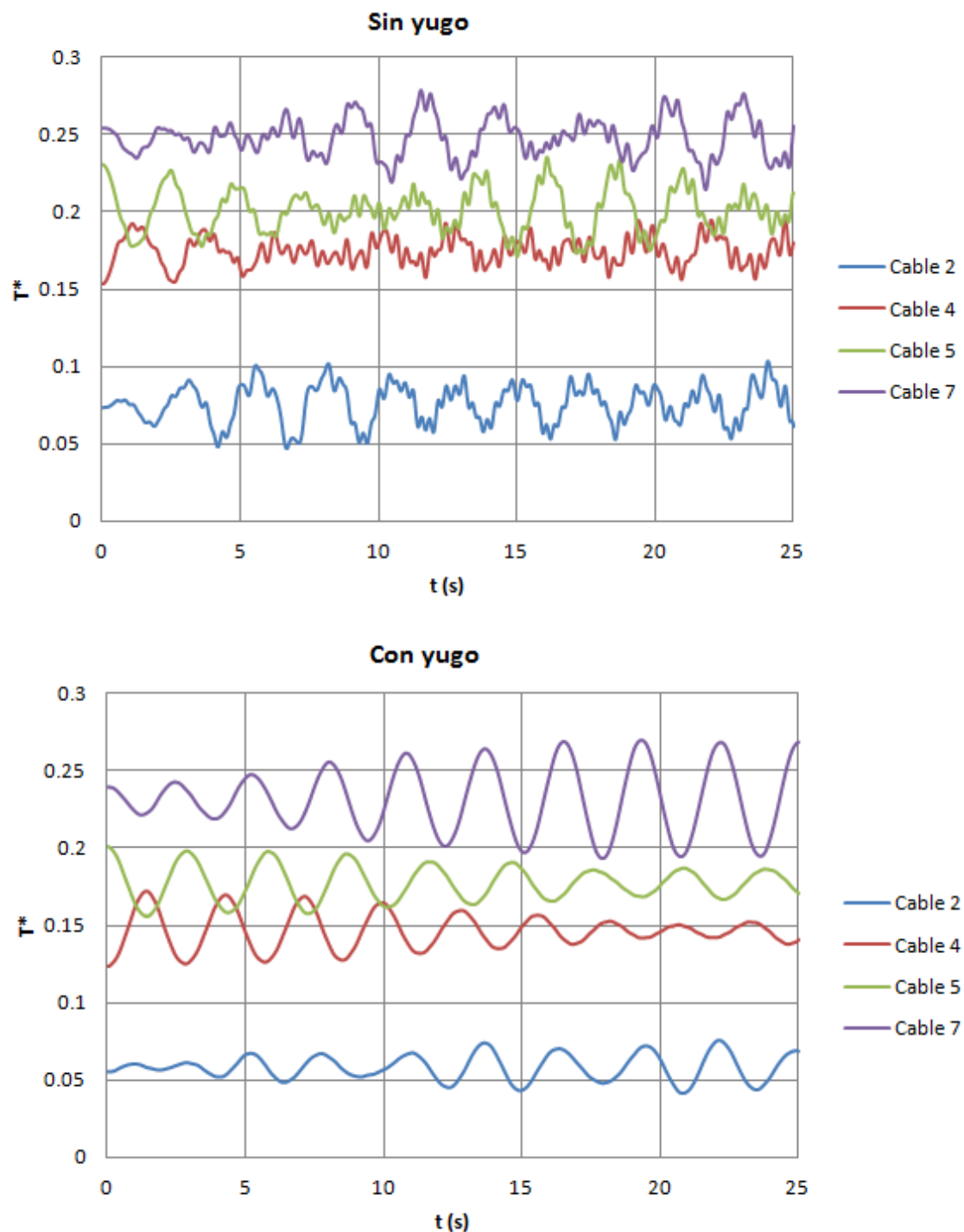
Debido a esto, cuando no tenemos *skew*, no se observa un patrón claro de aumento o disminución de tensiones, o se observan cambios poco importantes.

Sin embargo, cuando tenemos *skew*, al incluir el yugo en la grúa, se observa el mismo comportamiento en los cables que para aceleración en la dirección del carro. Los cables que aumentan su tensión debido al giro, disminuyen los valores de dicha variable, mientras que los cables que disminuyen su tensión por el citado giro, en este caso la aumentan. Se puede observar un ejemplo de esto en las **Gráficas 6.111 y 6.112**.

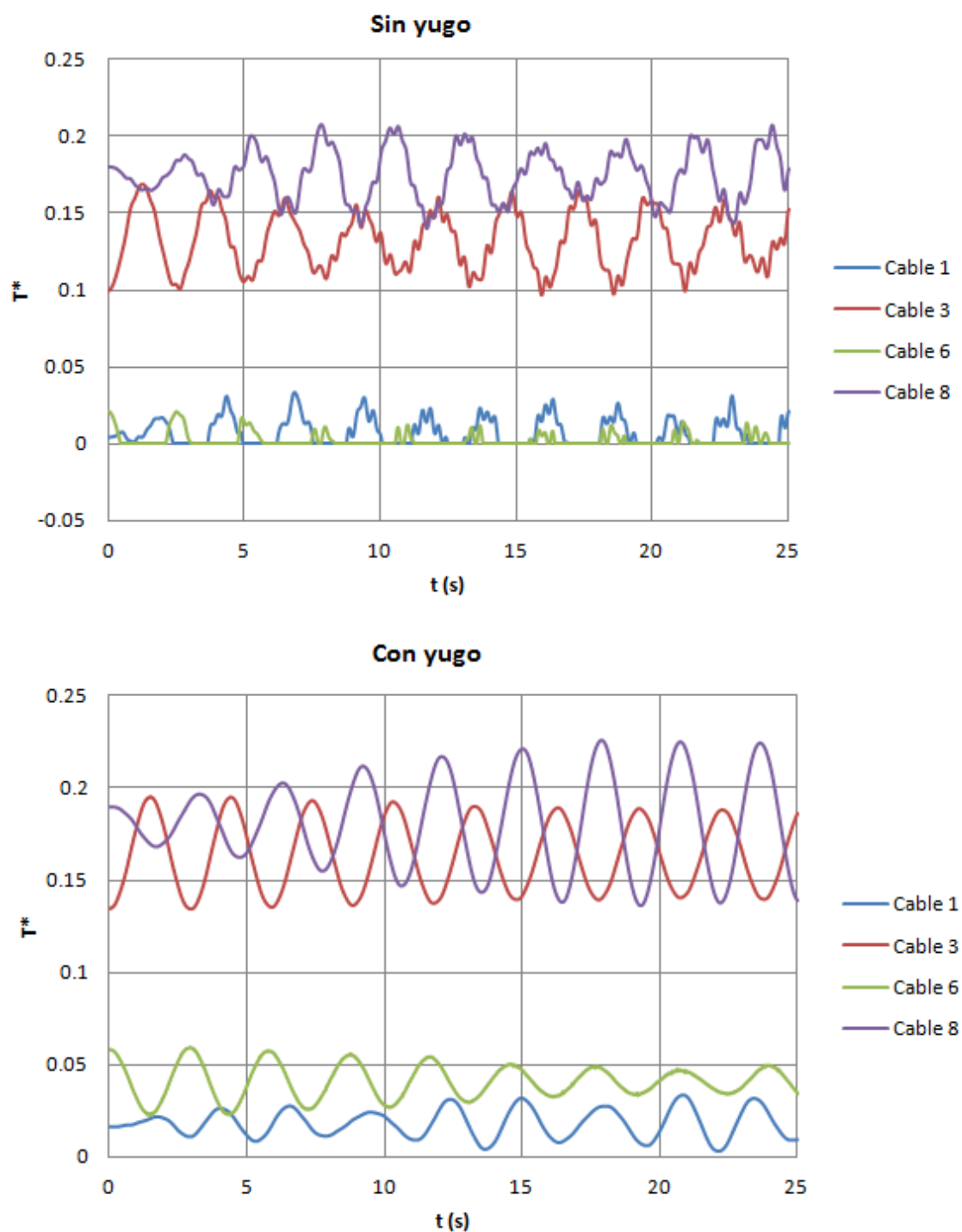
Podemos decir, por tanto, que cuando tenemos aceleración en la dirección del pórtico, el yugo es efectivo si inducimos *skew* en la carga suspendida, al igual que cuando aplicábamos aceleración en la dirección del carro. Esto se debe a que la existencia del citado elemento, dificulta, en cierta medida, la aparición de cables que no trabajan o que trabajan sobremanera por el hecho de girar la carga.



Gráficas 6.110: Desplazamiento relativo en x ($x_{\text{carro}} - x_{PM}$) y giro en y (θ_y) de la carga suspendida en función de si tenemos yugo o no y del tiempo para el caso 1 (carga centrada) y $\delta=0$ m



Gráfica 6.111: Tensión adimensional (T^*) de los cables que aumentan su tensión al realizar *skew* en la carga suspendida en función del cable y del tiempo para el caso 8 (carga descentrada en $-x+y$) y $\delta=25\text{ mm}$, sin yugo en el sistema (arriba) o con yugo (abajo).



Gráfica 6.112: Tensión adimensional (T^*) de los cables que disminuyen su tensión al realizar *skew* en la carga suspendida en función del cable y del tiempo para el caso 8 (carga descentrada en $-x+y$) y $\delta=25\text{ mm}$, sin yugo en el sistema (arriba) o con yugo (abajo).

3 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez hemos analizado los resultados de las simulaciones en 3D, estamos en disposición de exponer ciertas resoluciones, las cuales se muestran a continuación:

1. Validez del modelo realizado en 2D.

En las primeras simulaciones realizadas con el modelo en 3D, hemos podido comprobar que las suposiciones realizadas para la simulación de ciertos cables en 2D son válidas, puesto que se obtienen curvas de movimientos y tensiones prácticamente iguales en ambos modelos. Además, debemos tener en cuenta que, en las simulaciones en 3D, aparecen una serie de hechos, como son la no simetría del amarre de algunos cables o las pequeñas diferencias en ciertas dimensiones de algunos elementos. Esto podría hacer que obtuviéramos resultados distintos en 2D y 3D, aunque, como pudimos comprobar, dichos resultados no se ven afectados en exceso.

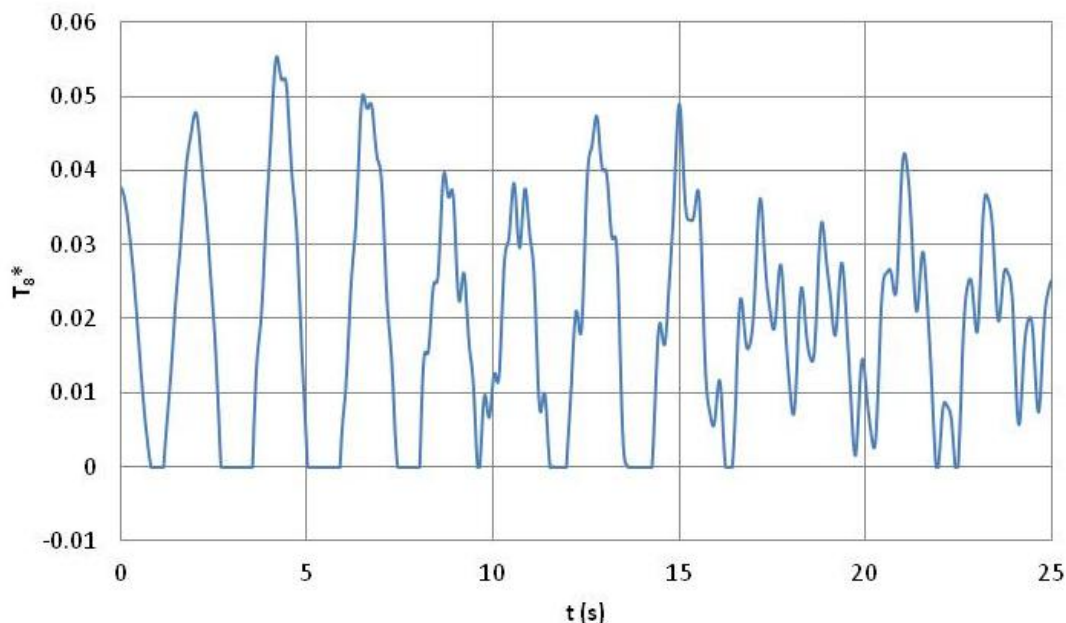
2. Valor de los parámetros de amarre d_x , d_y y d_A .

En el Punto 2.1 de este capítulo, realizamos una serie de simulaciones para ver la influencia que tendrían pequeñas variaciones de estos parámetros dentro del sistema. A continuación, y de forma muy resumida, mostramos nuestras impresiones en cuanto al valor que a nuestro juicio deberían tomar:

- **Valor alto del parámetro d_x :** utilizar un valor relativamente alto del este parámetro, supone una mejora en ciertas variables de movimiento, sin perjuicios importantes.
- **Valor mínimo del parámetro d_y :** los efectos del parámetro d_y se dejan notar, sobre todo, con carga centrada cuando el sistema se mueve en la dirección del carro. En esta situación, para evitar movimientos residuales debidos a la falta de simetría de los amarres de algunos cables al carro, sería conveniente utilizar un valor lo más pequeño posible del citado parámetro.
- **Valor relativamente alto, pero no excesivo, del parámetro d_A :** utilizar un valor grande del parámetro d_A , supone mejoras en el comportamiento de ciertas variables de movimiento. Sin embargo, si utilizamos un valor muy elevado, el comportamiento de la carga suspendida se podría ver afectado de forma bastante negativa, puesto que, principalmente cuando aplicamos aceleración en la dirección del carro, el desplazamiento en x se nos dispararía.

3. Existencia de algún cable que por periodos deja de trabajar (sin *skew* en la carga).

En las simulaciones realizadas en el Punto 2.1 de este capítulo, se advierte que el cable 8, por periodos, deja de estar tensionado en ciertos casos de distribución de la carga, cuando aplicamos aceleración en la dirección del carro. Podemos ver un ejemplo de esto en la **Gráfica 6.113**.



Gráfica 6.113: Tensión adimensional del cable 8 (T_8^*) en función del tiempo para el caso 6 (carga descentrada en $+x+y$), aceleración en la dirección del carro y con $d_x=0$ mm, $d_y=210$ mm, $d_A=1195$ mm y $\delta=0$ mm

4. $\delta \approx 25$ mm para obtener un giro en *skew* en torno a 3° en la carga suspendida en régimen estático.

Girar el contenedor un máximo 3° en *skew*, favorecería una mejor manipulación de los contenedores dentro del puerto. Este giro, se obtiene con un valor del parámetro δ de alrededor de 25 mm, para altura de suspensión igual a 14 m.

5. Mayor riesgo de no trabajo o trabajo excesivo de ciertos cables si la grúa trabaja con *skew* en la carga suspendida.

Al realizar *skew* en la carga, hay cables que aumentan su tensión y cables que la disminuyen (ver **Figura 6.159**). Esto hace que exista un mayor riesgo de aparición de cables que no trabajen o que trabajen demasiado.

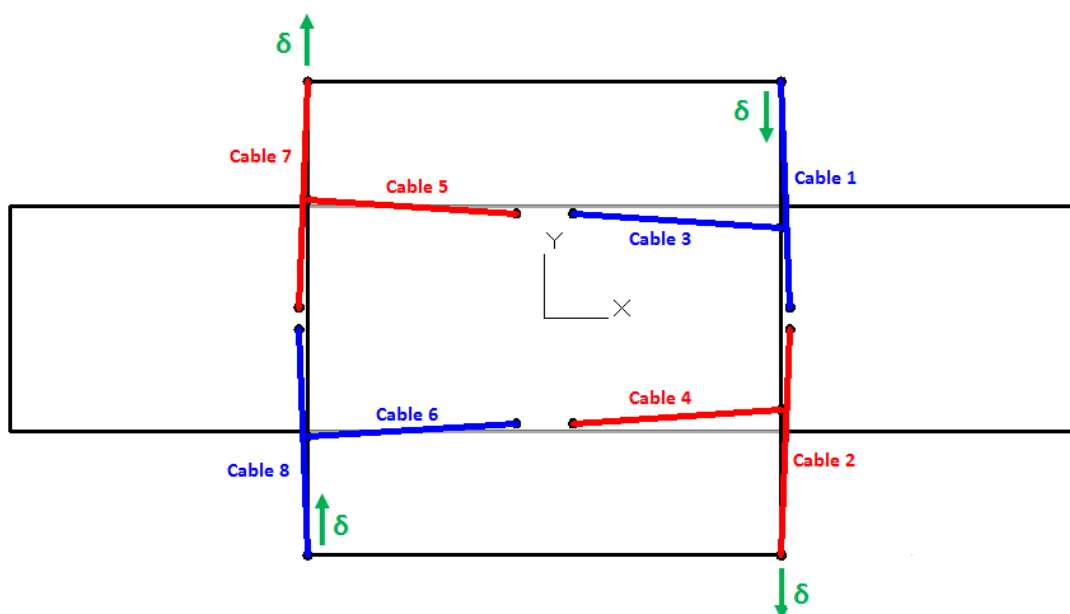


Figura 6.159: Vista en planta del sistema con los cables que aumentan su tensión (en rojo) y con los que disminuyen su tensión (en azul) al realizar *skew* en la carga suspendida

6. Conveniencia de introducir yugos en el sistema.

Teniendo en cuenta los anclajes elegidos para la implantación de yugos, cuando el sistema se mueve en la dirección del carro, la introducción de estos elementos mejora algunos aspectos del movimiento de la carga suspendida y empeora otros (dependiendo también del caso de distribución de la carga). Sin embargo, cuando el sistema se mueve en la dirección del pórtico, lo que más claramente se observa, es un empeoramiento en el giro y el desplazamiento del balanceo principal de la carga.

En cuanto a tensiones, la aparición de yugos en el sistema, regula en cierta medida las tensiones en los distintos cables y hace que se reduzca algo el riesgo (sobre todo cuando existe *skew*) de que haya cables que, por ejemplo, no trabajen. A pesar de ello, siguen apareciendo periodos en los cuales, dependiendo del caso de distribución de la carga, de la existencia de *skew* y de la dirección del movimiento de la grúa, hay algún cable que no está tensionado.

Creemos que la introducción de yugos en la grúa, no conlleva la aparición de ventajas suficientemente contundentes en comparación con sus inconvenientes como para incluirlos en el diseño de la misma. Por tanto, **en un principio, estos elementos quedan descartados.**



CAPÍTULO 7

Presupuesto

En este capítulo, realizaremos un análisis de los costes que conlleva la realización del presente proyecto. Para ello tendremos en cuenta gastos de personal, gastos en equipos informáticos, compra de licencias de software y gastos de impresión y papelería.

Si hablamos de las licencias de los distintos programas utilizados, es importante señalar que *Working Model 2D* posee la opción licencia anual mientras, que *Working Model 3D*, *Matlab*, *Sigview* y *Office 2013* incluyen licencias perpetuas a las que se les aplicará un periodo de depreciación de 6 años (72 meses).

Una vez aclarado todo lo anterior, pasamos a desglosar los costes del proyecto.

COSTES DE PERSONAL

Descripción	Tiempo invertido [horas]	Precio [€/hora]	Coste [€]
Documentación	30	30	900
Ingeniería	250	50	12.500
Total			13.400 €

Tabla 7.12: Costes de personal

COSTES DE LICENCIAS Y EQUIPO INFORMÁTICO

Descripción	Coste [€]	% de uso dedicado al proyecto	Dedicación [meses]	Periodo de depreciación [meses]	Coste imputable [€]
Equipo informático	1200	70	12	36	280
Licencia <i>Working Model 2D</i>	1195	100	6	12	597,50
Licencia <i>Working Model 3D</i>	3500	100	6	72	291,67
Licencia <i>Matlab</i>	2000	100	12	72	333,33
Licencia <i>Sigview</i>	124,50	100	6	72	10,38
Licencia <i>Office 2013</i>	119	50	12	72	9,92
Total					1.522,80 €

Tabla 7.13: Costes de licencias y equipos informáticos

COSTES DE IMPRESIÓN Y PAPELERÍA

Descripción	Coste [€]
Impresión de documentos	290
Material de oficina	5
Total	295 €

Tabla 7.14: Costes de impresión y papelería

SUMA DE COSTES TOTALES

Concepto	Coste [€]
Personal	13.400
Licencias y equipo informático	1.522,80
Impresión y papelería	295
Total antes de impuestos	15.217,80 €
Impuestos (21% de IVA)	3.195,74
TOTAL, IMPUESTOS INCLUIDOS	18.413,54

Tabla 7.15: Suma de costes totales

El coste total del proyecto asciende, por tanto, a la cifra de **18.413,54 €**.



CAPÍTULO 8

Conclusiones y trabajos futuros

1 CONCLUSIONES

Una vez vistos y analizados los resultados conseguidos en este proyecto, podemos exponer las conclusiones a las que hemos llegado a la finalización del mismo.

En primer lugar, podemos decir que hemos cumplido el objetivo principal de analizar el comportamiento del sistema de elevación en *reeving* y del sistema *skew* mediante simulaciones en 2D y 3D, para lo que ha sido preciso crear una serie de modelos originales y una metodología propia, que podrá ser de utilidad en la realización de futuros trabajos tecnológicos de este tipo.

Para cumplir dicho objetivo principal, también hemos tenido que ir cumpliendo los objetivos intermedios que nos marcamos al principio del proyecto y que aparecen explicados en el Apartado 2 del Capítulo 1 de esta memoria.

En este proyecto hemos realizado una serie de aportaciones, como son los modelos originales del sistema de cableado en *reeving* creados en 2D y 3D, la forma de estudio del problema del análisis del sistema de elevación de una grúa de patio, amén de la información que hemos producido sobre el comportamiento del sistema de cables en *reeving* y del sistema de *skew*.

Además, hemos podido llegar a una serie de conclusiones técnicas en base a los resultados obtenidos en las simulaciones, cuyas principales conclusiones se muestran a continuación:

1. Elevada rigidez del sistema.

El sistema es bastante rígido. Prueba de ello, son los bajos valores de los periodos y amplitudes de los distintos armónicos que obtuvimos en las simulaciones en 2D.

2. Fijación de los valores de algunos parámetros de amarre de los cables.

Se han propuesto unos valores primarios de algunos parámetros de amarre de los cables al carro o al cambio rápido, como son el cruzamiento o los parámetros de amarre: d_x , d_y y d_A .

3. Los cables trabajan con desequilibrio tensional.

Durante las simulaciones en 3D, pudimos comprobar que hay casos en los que existe una gran diferencia en cuanto a la carga que soportan los distintos cables, habiendo incluso cables que, por momentos, no se encuentran tensionados. Existen algunos casos en los cuales las tensiones máximas en un cierto cable serían de alrededor de 150 kN (con contenedor con carga nominal) mientras tenemos algún cable que, por instantes, no trabaja.

4. Los cables están sobradamente dimensionados.

Cabe reseñar que el cable utilizado en este tipo de grúas, resiste perfectamente el rango de tensiones antes mencionado, ya que tiene una tensión mínima a rotura de alrededor de 802 *kN*, muy superior a la tensión máxima a la cual se le solicita.

5. Parámetro de *skew* $\delta \approx 25 \text{ mm}$ para obtener un giro en torno al eje vertical aproximado de 3° en la carga suspendida en régimen estático.

Cuando nos encontramos en régimen estático, para obtener un giro de la carga suspendida igual a 3° en torno al eje vertical, se ha calculado que las poleas encargadas de llevar a cabo dicha acción, deben sufrir un desplazamiento δ de alrededor de 25 *mm*.

6. Se detecta un mayor un riesgo de trabajo excesivo, incluso de no trabajo, de los cables si la grúa opera con *skew* en la carga suspendida.

Al realizar *skew* en la carga hay cables que aumentan su tensión y otros que la disminuyen. Esto hace que aumenten los riesgos de que haya cables que se tensionen en exceso (respecto al valor promedio) y otros que se tensionen muy poco.

7. Se prescinde de utilizar yugos en el sistema

La utilización de yugos, es útil para regular las tensiones en los cables, principalmente cuando existe *skew* en la carga suspendida. Además, en algunos casos, supone una mejora en algunos giros o desplazamientos de dicha carga. Sin embargo, la introducción de estos elementos, hace que nos encontremos ante un sistema más flexible, lo que conlleva que se produzcan empeoramientos en ciertos desplazamientos y giros, en algunos casos muy pronunciados. Dicho esto, y tomando como referencia los resultados de las simulaciones, decidimos no incluir yugos en el sistema de cables de las nuevas grúas.

2 TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto, supone un estudio inicial sobre el sistema de cables en *reeving* y sobre el sistema de *skew* que montarán las nuevas grúas de patio.

A partir de aquí, se deberán llevar a cabo otra serie de actuaciones y trabajos para obtener sistemas que se ajusten lo máximo posible a lo que la compañía busca, teniendo en cuenta también las exigencias de los clientes y la normativa a cumplir.

A continuación, se dan una serie de ideas sobre qué se podría hacer a partir de ahora:

- Estudio estadístico de las masas que manejan las grúas para poder elegir mejor los parámetros de amarre de los cables, como es por ejemplo el cruzamiento.
- Desarrollo de la idea y diseño definitivo del sistema de *skew* de la grúa.
- Nuevo diseño del *spreader* para intentar eliminar el cambio rápido del sistema, lo que liberaría a la grúa del peso de dicho componente.
- Estudios sobre consumos de energía que tendrán las nuevas grúas, para poder mostrar al cliente los ahorros que se producirán en este ámbito con la implantación de los nuevos aparatos.
- Ajuste del diseño de la grúa a la normativa correspondiente.



CAPÍTULO 9

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Miravete de Marco A., Larrodé Pellicer E. **“Grúas”**. Universidad de Zaragoza, 1996.
- [2] Díaz López V., López Boada B., López Boada M^a J., Álvarez Caldas C., Ramírez Berasategui M^a B. **“Transportes”**. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2006.
- [3] Apuntes de la asignatura *Transportes*, de la titulación Ingeniería Industrial Superior, Universidad Carlos III de Madrid. 2013.
- [4] **“Working Model 2D”**. Manual de usuario. Design Simulations Technologies. 2010.
- [5] **“Working Model Tutorial”**. MSC Software Corporation. Revisado por última vez en 2004.
- [6] **“Working Model 3D. Tutorial Guide”**. Knowledge Revolution. 1997.
- [7] **“Working Model 3D. User’s Manual”**. Knowledge Revolution. 1997.
- [8] **“Getting Started with Matlab”**. The MathWorks. Versión 7, 2005.
- [9] **“Sigview User Manual”**. SignalLab. 2012.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- [10] Información sobre la compañía y sus grúas.
<http://www.paceco.es/>
Último acceso, mayo de 2015
- [11] Información sobre *Working Model 2D*.
<https://www.design-simulation.com/>
Último acceso, junio de 2015
- [12] Información sobre *Matlab*.
<http://es.mathworks.com/>
Último acceso, junio de 2015
- [13] Información sobre *Sigview*.
<http://www.sigview.com/>
Último acceso, junio de 2015
- [14] Enlace a información sobre los distintos tipos de contenedores marítimos.
<http://www.saftec.com.ec/containers.pdf>
Último acceso, enero de 2015
- [15] Enlace a información sobre contenedores marítimos.
<http://www.slideshare.net/jhonmorach/contenedores-8472518>
Último acceso, enero de 2015
- [16] Enlace a información sobre contenedores y *twist-lock*.
http://www.clonica.net/usuario/img_usuario/comercio-exterior.es/Herramientas_Doc/133.pdf
Último acceso, enero de 2015
- [17] Información sobre cables.
<http://www.casar.de/>
Último acceso, marzo de 2015
- [18] Enlace a información sobre cables.
<https://www.nobles.com.au/getattachment/2378a752-1da8-48bc-93eb-9e61d093b543/PDF.aspx>
Último acceso, marzo de 2015



- [19] Enlace a características y propiedades de cables
<http://www.wescovan.com/catalogs/technical.pdf>
Último acceso, febrero de 2015
- [20] Wikipedia
<https://es.wikipedia.org/>
Último acceso, marzo de 2015

